

IMPLEMENTAÇÃO LABORATORIAL DE UMA MICRO REDE COM PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA E FLEXIBILIDADE DE CARGAS

CLÁUDIO ANDRÉ SILVA CARDOSO

outubro de 2020

IMPLEMENTAÇÃO LABORATORIAL DE UMA MICRO REDE COM PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA E FLEXIBILIDADE DE CARGAS

Cláudio André Silva Cardoso



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia
2020

Unidade Curricular de DSEE - Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica –
Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Cláudio André Silva Cardoso, Nº 1151341, 1151341@isep.ipp.pt

Orientação científica: Pedro Faria, pnf@isep.ipp.pt

Coorientação no GECAD: Omid Abrishambaf, ombaf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2020

Agradecimentos

A todos aqueles que integram a comunidade do ISEP, desde os engenheiros aos colegas de curso, que ao longo de todo este percurso tiveram influência no meu trabalho, quero deixar uma palavra de apreço. Nesta comunidade, é de reconhecer o trabalho do meu orientador Dr. Pedro Faria, por todo o apoio e dedicação para me ajudar a concluir este trabalho. Ao meu coorientador Dr. Omid Abrishambaf, o meu muito obrigado pelo conhecimento transmitido e por todo o tempo investido.

Quero agradecer à minha família, destacando os meus pais, por tornarem isto possível, todo este percurso, e agora este trabalho final. À minha irmã e sobrinha, quero agradecer todos os votos de confiança, todos os momentos que me permitiram abstrair das partes menos boas do trabalho. Sem dúvida tiveram um papel fundamental, obrigado.

À minha namorada, não há palavras suficientes para reconhecer e recompensar todo esforço e apoio que me deu. Obrigado por todas as palavras de incentivo e de concentração, que tanta ajuda me deram. Sem ti, esta caminhada teria sido bem mais difícil. Esta vitória também é tua.

De forma geral, a todos os intervenientes neste trabalho, direta ou indiretamente, um bem-haja.

Resumo

A crescente utilização de energias renováveis fez surgir variações na produção de energia, provocando novos desafios na gestão da rede. No caso das micro redes, estas variações são ainda mais preocupantes. Como tal, há a necessidade de utilizar estratégias para mitigar estes problemas, sendo uma delas, a utilização de flexibilidade das cargas (*demand response*).

Nesta dissertação são abordadas as micro redes, dando-se grande importância à produção de energia elétrica através de fontes de energia renováveis. A produção de energia elétrica através de energia eólica, painéis fotovoltaicos e centrais mini-hídricas, é a base da produção para esta implementação. Com recurso a cargas flexíveis, aplicam-se programas de *demand response*. Deste modo, é feita uma gestão dos consumos face à produção, assegurando o fornecimento de energia elétrica a todos os clientes da rede. Para tal, foram aplicadas metodologias e controlados os emuladores do laboratório, através de uma infraestrutura SCADA. Esta implementação conta com a aplicação de programas de *demand response*, de forma a controlar os consumos da micro rede. A emulação é dividida em duas partes distintas. Na primeira, é feita a emulação dos diversos equipamentos do laboratório, de forma a estudar o seu funcionamento individual. Numa segunda parte, é emulado o caso de estudo que consiste numa micro rede constituída pelos equipamentos do laboratório, testados na primeira parte. A gestão de cargas num determinado intervalo, é feita pelo uso de programas de *demand response* aplicados, sucessivamente, até se atingir a redução desejada (*ramping*).

Com base nos resultados apresentados, fez-se uma análise do tempo de resposta dos equipamentos, bem como da viabilidade deste tipo de implementação em micro redes. Assim permite-se garantir um controlo fiável e seguro dos consumos e produções, de uma micro rede inteligente.

Palavras-Chave

Micro Rede, *Demand Response*, *Ramping period*

Abstract

The growing use of renewable energies has led to variations in energy production, causing new challenges in network management. In the case of microgrids, these variations are even more worrying. As such, there is a need to use strategies to mitigate these problems, one of which is the use of cargo flexibility (demand response).

In this dissertation, microgrids are approached, giving great importance to the production of electric energy through renewable energy sources. The production of electric energy through wind energy, photovoltaic panels and mini-hydro plants, is the basis of production for this implementation. With flexible loads, demand response programs are applied. In this way, consumption is managed in relation to production, ensuring the supply of electricity to all network customers. To this end, methodologies were applied, and the laboratory emulators were controlled through a SCADA infrastructure. This implementation relies on the application of demand response programs, to control the consumption of the microgrid. The emulation is divided into two distinct parts. In the first, the emulation of the various laboratory equipment is made, to study its individual functioning. In a second part, the case study is emulated, consisting of a micro network made up of laboratory equipment, tested in the first part. The management of loads in a determined interval, is made using demand response programs applied, successively, until the desired reduction (ramping) is reached.

Based on the results presented, an analysis was made of the equipment's response time, as well as the feasibility of this type of implementation in microgrids. In this way, it is possible to guarantee a reliable and safe control of consumption and production of an intelligent microgrid.

Keywords

Microgrid, Demand Response, Ramping period

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.MOTIVAÇÃO	2
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	4
2. CONCEITOS PRÉVIOS	5
2.1.REDES INTELIGENTES	5
2.2.MICRO REDE	7
2.3.DEMAND RESPONSE	11
2.4.SCADA.....	13
3. METODOLOGIA	15
3.1.APRESENTAÇÃO DO PROJETO.....	16
3.2.EQUIPAMENTOS EM LABORATÓRIO E AUTOMAÇÃO.....	18
3.3.INTERFACES DE CONTROLO DE EQUIPAMENTOS	22
3.4.IMPLEMENTAÇÃO DE PROGRAMAS DE DEMAND RESPONSE IN RAMPING	35
4. CASO DE ESTUDO.....	41
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
5.1.VALIDAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDIVIDUALIZADOS	47
5.2.RAMPING IN DEMAND RESPONSE.....	65
6. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

Índice de Figuras

Figura 1	Representação de uma rede inteligente [12]	6
Figura 2	Tempo de implementação de DR [3]	13
Figura 3	Representação da MR em estudo	16
Figura 4	Representação da MR em laboratório	19
Figura 5	Conexão entre PLC	22
Figura 6	Interface de controlo do menu inicial	23
Figura 7	Interface de controlo carga de 30 kW	24
Figura 8	Interface “ <i>Motor Bench 2 x 1,5 kW</i> ”	25
Figura 9	Interface de controlo motor 3 kW	26
Figura 10	Interface de controlo simulador de gerador assíncrono	27
Figura 11	Interface de controlo simulador do gerador síncrono	28
Figura 12	Interface de controlo <i>Lines</i>	29
Figura 13	Interface de controlo <i>L4 configuration</i>	30
Figura 14	Interface de informação sobre a linha 2	30
Figura 15	Interface de seleção de carga externa	32
Figura 16	Interface de controlo da carga variável	32
Figura 17	Interface de controlo da carga por níveis	33
Figura 18	Interface de controlo do nível 1 da carga	34
Figura 19	<i>Ramping Period</i>	35
Figura 20	Interface de controlo “ <i>Tools</i> ”	37
Figura 21	Interface de controlo do <i>ramping period</i> em modo automático	38
Figura 22	Definição do valor de fim de tempo de notificação e do ponto de início	39

Figura 23	Definição do valor do tempo de notificação e de resposta do programa	39
Figura 24	Definição do valor do prazo de início da redução do tempo final do evento	40
Figura 25	Perfil de consumo e produção da MR	42
Figura 26	Perfil de redução pretendido	43
Figura 27	Capacidade de redução de cargas	45
Figura 28	Análise da tensão para a carga de 30 kW	48
Figura 29	Análise da corrente para a carga de 30 kW	49
Figura 30	Análise da potência para a carga de 30 kW	50
Figura 31	Análise da tensão para motor 1	51
Figura 32	Análise da corrente para motor 1	52
Figura 33	Análise da potência para motor 1	52
Figura 34	Análise da tensão para motor 2	53
Figura 35	Análise da corrente para motor 2	54
Figura 36	Análise da potência para motor 2	54
Figura 37	Análise da tensão para os 2 motores	55
Figura 38	Análise da corrente para os 2 motores	56
Figura 39	Análise da potência para os 2 motores	57
Figura 40	Análise da tensão para o emulador assíncrono	58
Figura 41	Análise da corrente para o emulador assíncrono	59
Figura 42	Análise da potência para o emulador assíncrono	59
Figura 43	Análise da tensão para o emulador síncrono	61
Figura 44	Análise da corrente para o emulador síncrono	61
Figura 45	Análise da potência para o emulador síncrono	62
Figura 46	Análise da tensão para a carga por níveis	63
Figura 47	Análise da corrente para a carga por níveis	64

Figura 48	Análise da potência para a carga por níveis	64
Figura 49	Análise do <i>ramping</i> usando DR <i>programs</i>	67
Figura 50	Análise das tensões no <i>ramping</i>	68
Figura 51	Análise da produção de energia elétrica durante o <i>ramping</i>	70

Índice de Tabelas

Tabela 1	Tipos de programa de redução de carga	44
----------	---------------------------------------	----

Acrónimos

CC	–	Corrente Contínua
DLC	–	<i>Direct Load Control</i>
DR	–	<i>Demand Response</i>
DRP1	–	<i>Demand Response Program 1</i>
GECAD	–	Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento
HMI	–	<i>Human Machine Interface</i>
IDRP	–	<i>Interruptible Demand Response Program</i>
LC	–	<i>Load Controller</i>
MC		<i>Microsource Controller</i>
MGCC	–	<i>Micro Grid Central Controller</i>
MR	–	Micro Rede
MT	–	Média Tensão
PD	–	Produção Distribuída
PLC	–	<i>Power Line Communication</i>
RTU	–	<i>Remote Terminal Unit</i>
SCADA	–	<i>Supervisory Control an Data Acquisition</i>
VSI	–	<i>Voltage Source Inverter</i>

1. INTRODUÇÃO

Um pouco por todo o mundo existem regiões remotas e totalmente isoladas, normalmente associado à sua localização geográfica, ou à falta de acessos. Regiões como essas, não são tão beneficiadas como as grandes comunidades do litoral, e por vezes, nem têm acesso a energia elétrica. Aquelas que têm acesso a energia elétrica, esta é transportada por grandes distâncias através de dispendiosas linhas de transporte [1]. A produção de energia centralizada, cada vez menos, se faz com recurso combustíveis fósseis em centrais térmicas, a carvão ou a gás natural. Com base nas crescentes preocupações ambientais e nas políticas de neutralidade carbónica, é necessário agir.

Deste modo, a criação de micro redes (MR) nunca fez tanto sentido, aliando a necessidade de abastecimento de energia elétrica com a produção distribuída (PD). Dadas as características destas regiões remotas, a aplicação de MR trará benefícios económicos, uma vez que não há necessidade, com o aumento da procura, da construção de novas redes de transporte, ou então, de grandes centrais térmicas para produção de energia elétrica. Traz também benefícios ambientais, dado o elevado potencial de utilização de fontes de energias renováveis. Uma MR que pretenda reduzir a sua dependência da rede elétrica, deve considerar a utilização de energia eólica, painéis fotovoltaicos e ainda, se disponível o recurso à energia hídrica, através de centrais mini-hídricas.

A limitação dos recursos energéticos disponíveis, faz com que a utilização de PD utilizando energias renováveis seja fundamental no funcionamento de uma MR [2]. A combinação de PD com um método de gestão de consumos, com base na aplicação programas de *demand response* (DR) em *ramping*, permite que se possa fazer um equilíbrio dos consumos, face às produções [3].

1.1. MOTIVAÇÃO

A realização deste projeto, surge na resposta a uma proposta existente por parte do Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD), mais concretamente em resposta a uma proposta do DR. Pedro Faria. Sendo o tema proposto de elevado interesse para o autor surge então, este trabalho.

A crescente inclusão de PD nas redes elétricas ameaça a sua operação, como tal é necessário lidar com estas incertezas, essencialmente nas redes inteligentes [4]. A gestão dos recursos energéticos, principalmente os provenientes de energias renováveis, é um dos problemas mais desafiadores das MR [5]. O escalonamento ideal dos recursos disponíveis é um dos objetivos da gestão dos recursos energéticos. Através do uso de técnicas de otimização, pode obter-se uma solução ótima para o dia seguinte, num período razoável [6]. Deste modo, para o uso de DR pode contar-se com uma previsão otimizada dos consumos e produções da MR, para o dia seguinte. Assim, para a aplicação de programas de DR sucessivamente, ou seja, em *ramping*, existe uma previsão do valor de redução necessário [3]. Para que se possa efetuar este controlo inteligente e flexível podem ser usados modelos SCADA [7].

Assim, não só é possível garantir o equilíbrio entre o consumo e a produção, bem como a segurança e fiabilidade da MR.

1.2. OBJETIVOS

Com a realização deste trabalho pretende-se fazer uma implementação em laboratório de uma MR, usando estratégias de flexibilidade de cargas, mais concretamente programas de DR, aplicados sucessivamente, ou seja, em *ramping*. De forma, a que se possa reduzir a dependência da MR da rede elétrica de distribuição.

Para tal, foram definidos os seguintes objetivos:

- Estudar os métodos de controlo e de gestão para MR;
- Criar software de automação;
- Definir uma metodologia de trabalho;
- Definir e executar o caso de estudo.

Na execução das tarefas que cada um dos objetivos incluí, foram surgindo desafios como, a utilização de um software desconhecido, para criar programação e interfaces de controlo. A definição da metodologia demonstrou-se, sem sombra de dúvida a parte mais desafiante, uma vez que foi necessário testar exaustivamente, e afinar cada detalhe, para que se pudesse executar o caso de estudo.

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A realização deste trabalho decorreu ao longo de um período de dez meses. Nos primeiros dois meses de trabalho no laboratório do GECAD, iniciou-se o tema e a pesquisa de documentos para integrarem o estado da arte. Deram-se também os primeiros passos no software de automação, em conciliação com as restantes atividades letivas.

O controlo dos equipamentos do laboratório foi a tarefa iniciada de seguida, através da criação de programas de automação, bem como de interfaces de controlo. Dada a pandemia causada pelo covid19, esta fase do projeto foi afetada, mas ainda assim, a realização das interfaces de controlo prosseguiu à distância, sendo necessário uma nova fase de testes quando foi possível regressar aos trabalhos em laboratório. Durante o trabalho à distância, foi desenvolvido trabalho associado a tratamento de dados e árvores de decisão, trabalho esse que não seria incluído neste documento dada a incapacidade de atingir os resultados desejados.

Após a reabertura das instalações do GECAD, foi realizado trabalho no âmbito do caso de estudo e da obtenção de resultados nos equipamentos do laboratório. Procedendo-se à escrita e concluindo assim este documento.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento encontra-se dividido em seis capítulos, em que o capítulo em causa é o primeiro, havendo ainda mais cinco capítulos.

No primeiro capítulo, a introdução, é feito todo o enquadramento do trabalho realizado, são referidos os objetivos e a calendarização do trabalho.

No segundo capítulo, conceitos prévios, é descrita toda a fundamentação teórica que o trabalho desenvolvido tem por base. Explica os conceitos fundamentais para que seja possível uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido.

No terceiro capítulo, metodologia, são descritos os métodos de trabalho. Aqui é explicada a estrutura da MR, tanto fictícia, como aquela em que se trabalhará em laboratório. São também descritos neste capítulo, todos os equipamentos com os quais se trabalharão e para os quais são criadas interfaces de controlo. Bem como, é referido o conceito base de funcionamento desta MR, a aplicação de programas de *DR* em *ramping*.

No quarto capítulo, caso de estudo, é apresentado o perfil da MR e o intervalo que se pretende emular. Neste capítulo, são definidas e explicadas todas as opções e condicionantes da emulação a realizar.

No quinto capítulo, apresentação de resultados, são apresentados os resultados das emulações realizadas aos equipamentos e do caso de estudo. Ou seja, numa primeira parte os resultados das emulações individuais de cada equipamento e, numa segunda parte os resultados do caso de estudo do capítulo anterior.

No sexto capítulo, conclusão, o último capítulo do documento, são apresentadas as considerações finais e as conclusões obtidas através do trabalho realizado. É ainda de realçar a presença de uma lista de referências bibliográficas que se encontra na parte final do documento.

2. CONCEITOS PRÉVIOS

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica na qual este trabalho se baseia, encontrando-se dividido em quatro subsecções. Na primeira é apresentado o conceito de redes inteligentes, abordando as vantagens que estas trazem às redes elétricas. A crescente inclusão de PD faz surgir a segunda subsecção, que apresenta as MR e que se encontra dividida em duas partes distintas, MR ligada com a rede elétrica e MR em regime isolado. Deste modo, atingimos o conceito de MR inteligentes, como tal surge a terceira subsecção referente a DR, que visa a criar soluções para os problemas técnicos que surgem com a inclusão de PD em MR inteligentes. Na última subsecção, é abordado o tema SCADA, que demonstra ser uma interface de controlo altamente eficaz em processos industriais, e que pode ser usada em MR.

2.1. REDES INTELIGENTES

Ao longo do tempo, a procura da energia elétrica tem aumentado. Com isto, os requisitos de qualidade do fornecimento são cada vez mais exigentes. Deste modo, foi necessário evoluir e avançar para um novo conceito de rede elétrica. Assim, surgem as redes inteligentes muitas vezes denominadas por *smart grids*, que apresentam na atualidade um papel muito importante nas redes de energia elétrica. Esta nova abordagem das redes elétricas demonstra-se dinâmica, inovadora, mais eficiente e sustentável [8]. A utilização

de *smart grids*, permite o uso de soluções técnicas que possibilitam a flexibilidade das produções e dos consumos [9]. Uma vez que através delas é possível aprimorar a monitorização e o controlo das produções e consumos, pois neste tipo de rede são incorporadas tecnologias modernas de informação e comunicação [10]. Isto, permite uma melhor eficiência, através da existência de um fluxo bidirecional, entre produtores e consumidores [11]. Na Figura 1 pode ver-se a representação de uma rede inteligente, onde é possível destacar a produção descentralizada, e as conexões entre todos os intervenientes da rede.

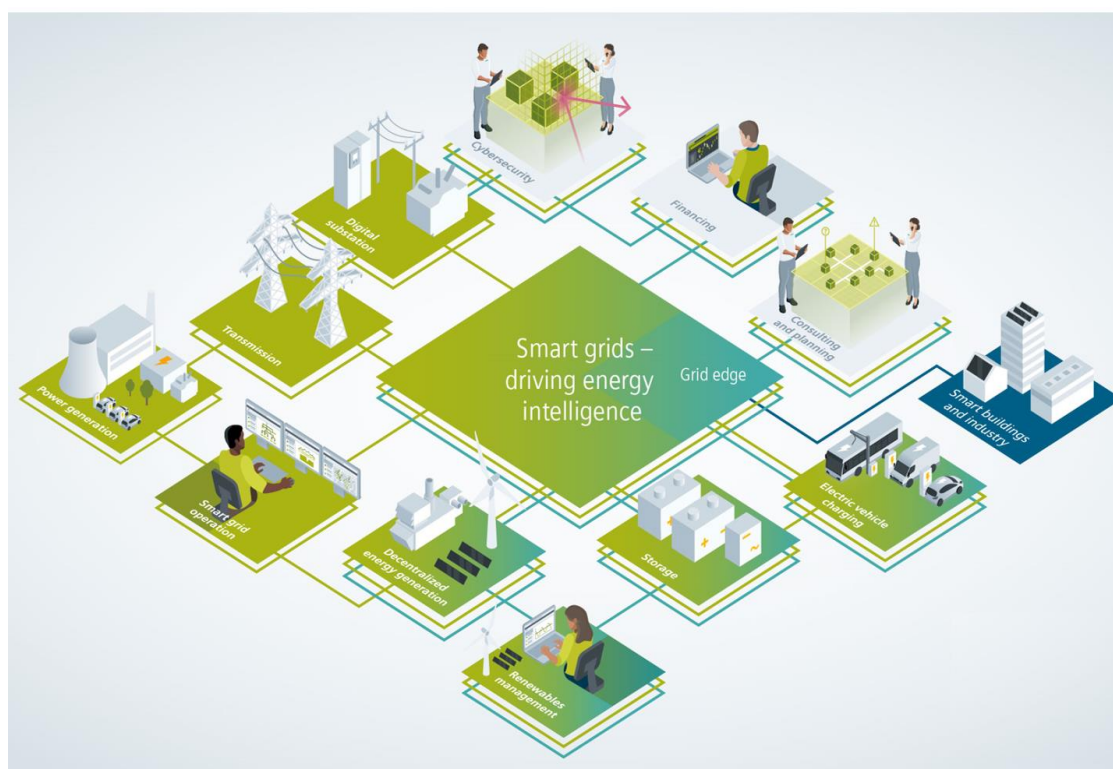


Figura 1 Representação de uma rede inteligente [12]

A qualidade do serviço da rede elétrica melhora muito quando falamos de redes inteligentes, pois predominam o conforto, a transparência e a rapidez [8]. As redes inteligentes permitem também reduzir os custos de produção e transporte da energia [11]. Uma vez que nas MR, utilizando PD é favorecida a integração de fontes de energia renováveis [9].

Com tudo isto, as redes inteligentes apresentam muitas vantagens, como a redução dos picos de consumo [11]. Pois, com a fluência de informação é possível saber em antemão a necessidade ou não de funcionamento de centrais de produção, sendo o uso de renováveis prioritário. Deste modo, o investimento em centrais de produção e na distribuição, é

minimizado. O investimento em PD fará diminuir as perdas na distribuição visto que, os consumidores também podem ser produtores, vendendo os seus excedentes de produção à rede. Este conceito de produtor descentralizado, é uma das bases das redes inteligentes que trazem muitas vantagens, não só à rede elétrica e ao ambiente, mas também aos consumidores [8]. Uma forma de se fazer isto é através de contadores inteligentes, havendo vários modelos deste tipo de equipamentos a serem usados em Portugal, pela Energias de Portugal (EDP) Distribuição [13]. O contador inteligente um equipamento fundamental para a integração do conceito de rede inteligente, permitindo uma comunicação constante em tempo real, à distância. Sendo que, com a sua integração os consumidores apenas irão pagar a energia elétrica que consomem, sem necessidade de leituras manuais [13]. Sempre que for necessário proceder a alterações contratuais, as mesmas podem ser executadas remotamente e qualquer intervenção para ativar, encerrar ou aumentar a potência, será feita à distância [14].

Para que se possa tirar o maior proveito possível da rede inteligente, podem ser incorporados sistemas de armazenamento de energia elétrica [9]. A integração de veículos elétricos, possibilita o aproveitamento máximo da energia proveniente das fontes renováveis. Ou seja, como um armazenamento em baterias, ou aproveitando esse período para o carregamento dos veículos, obtém-se uma maior eficiência [15].

As redes inteligentes apresentam características fundamentais para a aplicação de conceitos como MR e deslocação no tempo de consumos e produções, através de programas de DR [10]. O uso de DR permite uma maior flexibilidade à rede, o que cada vez mais tem um papel importante nas estruturas das redes inteligentes, com a aplicação de vários tipos de projetos de DR [2]. Deste modo, pode dizer-se que uma MR é um componente que integra um *smart grid*.

2.2. MICRO REDE

A crescente utilização de grandes volumes de PD nas redes elétricas fez surgir um sistema de produção descentralizado. Problemas como a confiabilidade e gestão nos sistemas elétricos de energia (SEE), fizeram surgir as MR [16]. As MR são sistemas de distribuição de baixa tensão (BT), que permitem melhorar a eficiência e a fiabilidade do sistema, através da PD, de soluções de armazenamento de energia e cargas controláveis [17]. Integra também uma MR um sistema avançado de gestão e controlo, numa infraestrutura

dedicada à comunicação, para garantir não só a fiabilidade, mas também a segurança da rede [18].

Em comparação com as grandes redes elétricas, com produções centralizadas, usando fontes de energia renovável, o comportamento dinâmico da MR é bastante diferente dado à falta de inércia [17]. Numa MR a distribuição da energia elétrica é mais eficiente. Pois, dada a significativa redução da distância entre o consumidor e o produtor, as perdas no transporte são reduzidas [19]. Isto traduz-se em ganhos de eficiência energética, consequentemente ambientais e económicos.

O controlo da MR, como já referido é um importante aspeto a ter em conta. Deste modo, a MR é controlada por uma estrutura hierárquica. Nesta estrutura, o nível principal é o controlador central, *Micro Grid Central Controller* (MGCC) [20]. Este deve estar instalado na interligação da rede de média tensão (MT) com a MR. Este controlador é uma unidade de controlo e gestão muito completa, que tem como função providenciar previsões de consumos de cargas, bem como prever a capacidade de produção de energia elétrica. No segundo nível hierárquico estão instalados os controladores dos dispositivos de armazenamento e de microprodução, *Microsource Controller* (MC) [20]. Os MC são responsáveis pelo controlo das produções de potência ativa e reativa, desde que as mesmas o permitam. Ainda neste nível, estão também instalados os sistemas de controlo de cargas *Load Controller* (LC) [20]. Os LC controlam as cargas, e são dotados da capacidade de, caso seja necessário, deslastrar cargas não prioritárias. De modo a que as MR funcionem corretamente, é necessário que haja comunicação e interação entre os níveis hierárquicos de controlo. É esperado que exista comunicação entre o MGCC e o *Distribution Management System* (DMS), que se encontra do lado da rede de distribuição, permitindo que o sistema de distribuição de MT, possa melhorar a sua gestão e operação [21].

Uma MR, é um tipo de rede inteligente, no entanto existe uma particularidade que a distingue das demais. Pois as MR, têm a particularidade de poderem ser operadas em dois modos distintos. Isto é, uma MR pode operar ligada ou desconectada da rede de MT. A MR, quando está conectada à rede, funciona em paralelo com a rede de distribuição MT. No funcionamento em modo isolado, esta conexão à rede de distribuição MT não existe. Este isolamento da MR da rede de MT, pode ser temporário ou então a longo prazo [22].

MICRO REDE LIGADA À REDE

O funcionamento da MR conectada à rede de MT, é muitas vezes denominado de modo normal de operação. Neste tipo de funcionamento, como vimos e segundo [20], o controlador MGCC é responsável pela operação da MR, fazendo uma gestão técnica e económica da mesma. Com o auxílio dos MC e LC, o MGCC tem como objetivo otimizar a MR [21]. Para tal, ocorre comunicação entre eles, o MGCC determina quais as cargas que os LC devem alimentar e o nível de produção que os MC devem regular nos produtores. Estes por sua vez, enviam as informações às cargas e aos produtores [21]. O MGCC é capaz de determinar qual a quantidade de energia que a MR deve obter através da rede de distribuição de MT [21]. Uma vez que dispõem de todas as informações sobre a rede, incluindo a informação referente a preços de mercado e dos combustíveis. O MGCC tem ainda o controlo da rede. Deste modo, o controlador central faz uma gestão otimizada controlando a quantidade de energia elétrica que deve ser injetada pela rede a montante, ou produzida na própria MR, tendo ainda a capacidade de gerir as cargas e consequentemente os consumos.

Do ponto de vista económico, podem ser usadas duas estratégias pela MR. Numa, a MR tenta minimizar a importação de energia, minimizando assim o custo da energia elétrica para os consumidores, não vendendo energia à rede [16]. Numa outra abordagem tenta obter lucros com a compra e venda do excedente de energia à rede.

MICRO REDE EM REGIME ISOLADO

A MR pode operar em regime isolado, sendo que este é muitas vezes referido como o modo de emergência. Por norma uma MR encontra-se conectada a uma rede de distribuição de MT, e, como tal, em caso de anomalia ou de manutenção por questões de segurança a MR fica a operar isolada. No entanto, as MR em regime isolado muitas vezes nem tão pouco possuem interligação com a rede de MT. Deste modo, o funcionamento da MR é igual seja uma situação temporária ou a longo prazo.

O funcionamento em rede isolada, exige à MR a capacidade de garantir a alimentação das cargas que lhe estão associadas, bem como manter os valores dos níveis de tensão e frequência dentro da gama definida [23]. Num caso de deslastre da MR, a existência de produção descentralizada, permitirá garantir o abastecimento das cargas. No entanto, a estratégia adotada pelo MGCC para a operação da rede terá obrigatoriamente de ser

diferente. Uma vez que, o funcionamento em modo de emergência requer a solução de várias questões técnicas essencialmente ao nível do controlo do sistema.

A MR tem obrigatoriamente de manter a frequência e a tensão controlada, no entanto, as fontes de produção da rede não têm inércia, uma vez que usam dispositivos de eletrónica para se ligarem à rede [17]. Posto isto, é essencial emular através de *Voltage Source Inverter* (VSI), comportamentos semelhantes aos das máquinas síncronas [24]. Uma vez que, na falta destas é necessário garantir o equilíbrio entre a produção e a carga controlando a frequência. Deste modo, é possível impor valores de referência de tensão e frequência na MR, através dos inversores, mas mesmo assim ocorre uma dificuldade em equilibrar a carga e a produção instantaneamente [24]. Uma vez que, a maioria das fontes de produção tem uma resposta lenta, sendo por isso o uso de dispositivos de armazenamento de energia, essenciais à operação da MR em modo isolado [17]. Outra forma de eventualmente garantir a regulação dos valores de tensão e frequência, pode passar pelo deslastre de cargas.

Os inversores VSI, emulam o comportamento da máquina síncrona [24]. Em modo isolado, estes efetuam medições aos seus terminais da tensão e da frequência. Comparando os mesmos com valores referência, previamente estabelecidos [24]. Assim, com base nos valores medidos, os VSI injetam ou absorvem potência ativa ou reativa, caso a tensão ou a frequência estejam acima ou abaixo, dos valores de referência [24]. Este tipo de controlo é referido como *droop control* [25]. Este é um dos equipamentos usados para a operação das fontes de produção de energia, no entanto podem ser usados outro tipo de inversores [24]. Os inversores PQ não têm a capacidade de impor valores de tensão ou frequência à MR, sendo que com o seu funcionamento toda a energia disponível na fonte é injetada na rede [25]. Com exceção da energia reativa, uma vez que a sua injeção é determinada localmente pelo MGCC. Para o controlo segundo [24], de um MR podem ser usadas duas estratégias distintas. Sendo elas, *Single Master Operation* (SMO), que a operação usa apenas um inversor VSI e os restantes serão inversores PQ, controlado pelo MGCC. Ou então *Multi Master Operation* (MMO), que é muito semelhante ao anterior, no entanto, são usados vários inversores VSI [24].

O uso de inversores tem um papel fundamental nas MR em regime isolado, como já foi referido, garantem a estabilização dos valores de tensão e frequência, que se encontram vulneráveis por causa do deslastre da rede de MT [25]. Mesmo em regimes totalmente

isolados, a falta de inércia da MR, pode ser compensada com os inversores como vimos. No entanto, o comportamento dinâmico da MR pode ser melhorado se usado o conceito de cargas controláveis. Através do deslastre de cargas, é possível combater as grandes variações de frequência. Sendo que, um bom método usado para esse fim em MR inteligentes isoladas é através de DR.

2.3. *DEMAND RESPONSE*

Uma MR inteligente é uma rede elétrica, que visa a fornecer energia elétrica de forma controlada, desde as fontes de produção até aos consumidores. Para tal, o pouco controlo nas fontes renováveis, a falta de reservas girantes e os dispendiosos sistemas de armazenamento, dificultam a tarefa [26]. A forte inclusão de energias renováveis, acresce novos problemas relacionados com a regulação da tensão e da frequência [27]. Assim sendo, cada vez mais o recurso a DR é uma solução para este tipo de rede inteligente [28].

A DR oferece uma elevada gama de benefícios operacionais e financeiros, promovendo a interação e a capacidade de resposta dos clientes [27]. Este novo paradigma incide no planeamento e na operação, de forma a prever e a controlar a demanda do lado do consumidor. Ou seja, com base na energia elétrica produzida pelos recursos disponíveis, o consumo de energia é adaptado ao máximo, ou contrário do modelo convencional em que se adequa a produção aos consumos [29]. Deste modo, a DR pode estabelecer o equilíbrio entre a oferta e a procura de energia elétrica em tempo real, com um custo reduzido em comparação com a soluções tradicionais (reservas girantes não girantes) [30]. A DR refere-se a "mudanças no uso de eletricidade por clientes finais de uso de seus padrões de consumo normais em resposta a alterações no preço da eletricidade ao longo do tempo, ou para pagamentos de incentivos projetados para induzir menor consumo de eletricidade em épocas de preços de mercado de alto nível ou quando a confiabilidade do sistema é posta em risco" [30].

Este controlo dos consumos não deve nunca comprometer atividades críticas de determinados consumidores [29]. Assim sendo, surgem os consumidores sensíveis, que se designam por clientes que não podem ver o seu serviço interrompido, como hospitais e serviços públicos. Os consumidores não sensíveis, que são aqueles clientes que podem ver os seus consumos reduzidos em determinados períodos do dia. Como se pode ver, o

controle por DR apenas é aplicado a alguns tipos de consumidores. Trazendo benefícios, não só para os consumidores, bem como para os fornecedores de energia elétrica [29].

Apesar da aplicação de estratégias de DR parecer atraente, exigem um complexo controle e acordo entre os consumidores e o gestor da rede. Inicialmente é necessário um estudo sobre o nível de cultura de energia dos consumidores. Entendendo que, o uso de DR implica o um novo comportamento nos consumos dos clientes, bem como uma mudança nos seus hábitos [28]. Deste modo, é essencial a criação de campanhas de sensibilização, e métodos educacionais sobre o uso de energia elétrica, mas essencialmente o uso de remunerações associadas à DR. Para isto, os consumidores podem investir em equipamentos mais eficientes e usá-los de forma mais racional, ou então, participar em programas de DR. No uso de programas de DR, muitas vezes os consumidores ficam sujeitos a algum desconforto, por não poderem usar as suas cargas da forma que querem devido à limitação contratual que subscreveram [28]. Como tal, existem formas para que os programas de DR sejam menos prejudiciais para o cliente, como reduzir o consumo de energia através de estratégias de redução de cargas. Os clientes podem também, mover os seus consumos de energia para outro intervalo mais favorável à rede [31]. Ou por último, utilizando produção de energia própria para autoconsumo, reduzindo a dependência da rede [28]. Estas estratégias, na prática, traduzem-se através da redução dos níveis de iluminação, da utilização de equipamentos de aquecimento ou refrigeração em períodos mais favoráveis para rede, durante uma tempo maior, de forma a poderem ser desligados em períodos de maiores consumos. Assim sendo, existem alguns tipos de programas de DR, podendo os mesmos ser voluntários ou obrigatórios. Para programas de DR como *direct load control* (DLC), ou seja, controle direto da carga, o controlador da rede pode diretamente, por controle remoto, controlar o consumo de um determinado equipamento, como iluminação ou ar condicionado [32]. Sendo, esta redução, associada a uma remuneração definida num contrato entre ambos os intervenientes. Como alternativa, a este tipo de programas de DR, existem os de teor voluntário, em que o consumidor é notificado para que proceda à redução das suas cargas [3]. Isto deve acontecer essencialmente em horas de pico, sendo o cliente beneficiado com o preço da eletricidade nos outros períodos, ou então através de remunerações [28]. Como vimos, podem ser aplicados vários tipos de programas de DR. No entanto é importante considerar a escala de tempo específica de cada programa. Na Figura 2, pode ver-se que dependendo do tempo disponível, o controlador deve escolher qual o programas ou programas de DR que mais se adequam.

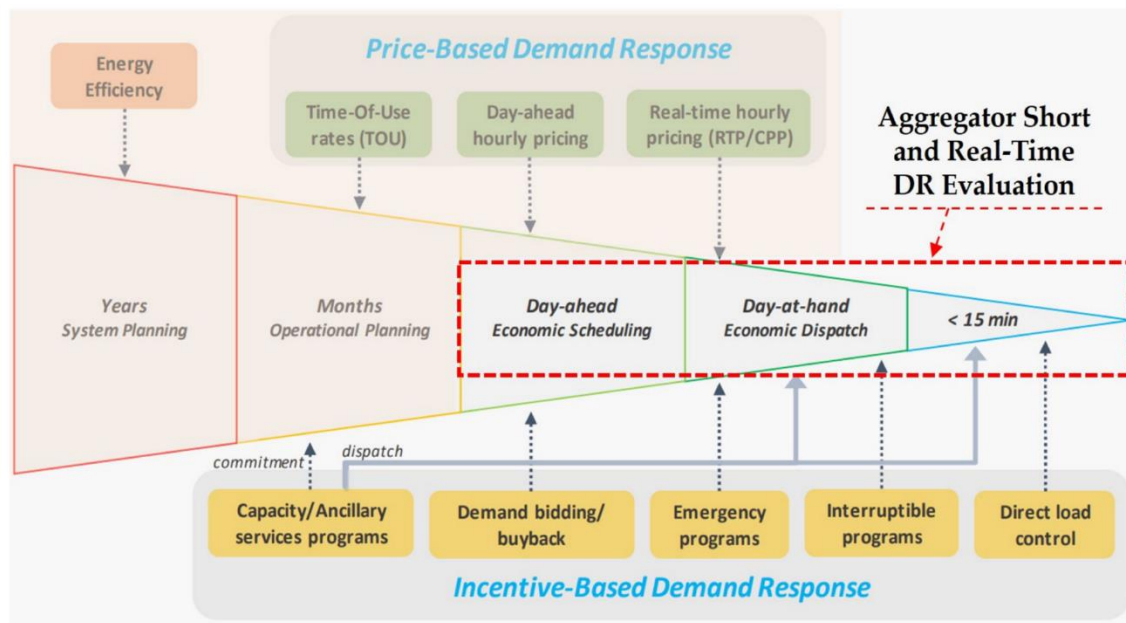


Figura 2 Tempo de implementação de DR [3]

Os programas de DR são baseados em remunerações, seja através de um desconto na tarifa de energia, ou então em incentivos por kWh reduzido nos consumos. [33] Este tipo de programas, pode ser aplicado num curto espaço de tempo, ou seja, é possível em menos de quinze minutos notificar e aplicar um programa deste tipo [3]. Como tal, em situações críticas, para a segurança da rede, estes podem ter um papel fundamental. Posto isto, para tornar possível a aplicação de programas DR, é necessária uma abordagem de programação, sendo *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) uma das possibilidades para este tipo de controlo, como veremos.

2.4. SCADA

O SCADA é um sistema que inclui componentes de hardware e software e permite o supervisionamento e controlo, seja local ou remotamente. O SCADA permite examinar, recolher e analisar dados em tempo real. Este tipo de sistemas são muitas vezes usados para controlar processos industriais, uma vez que permitem o registo de um histórico de informação, e a automação de redes inteligentes [34]. A utilização de um sistema SCADA, permite o controlo de processos industriais, por exemplo, interagindo diretamente com equipamentos industriais. Isto é feito a partir de um ponto central, podendo o controlo ser feito com base nos dados recebidos. Esse tipo de sistema, permite a elaboração em tempo real de relatórios dos seus processos e o arquivamento dos mesmos [35].

Um sistema SCADA combina elementos de *hardware* e *software*, e é constituído essencialmente por 5 hierarquias ou níveis [36]:

- Dispositivos de controlo no terreno;
- Terminais de triagem e *Remote Terminal Unit* (RTU);
- Sistemas de comunicação;
- Supervisão;
- Tecnologia de informação comercial

Os RTU ou *Power Line Communication* (PLC) convertem os sinais digitais ou analógicos dos dispositivos de controlo do terreno [36]. Estes podem ser sensores, válvulas, bombas, motores e Human Machine Interface (HMI). Os sistemas de comunicação fornecem o caminho para a informação fluir entre a supervisão e os dispositivos remotos. A supervisão recebe a informação dos vários RTU e fornece-a a uma HMI, que são telas usadas pelos operadores para comunicar com o sistema em tempo real [37]. Ou então, a informação é fornecida ao armazenamento, sendo possível também haver uma supervisão automática. A comunicação entre os diversos níveis é feita por protocolos como *Ethernet Internet Protocol* (IP), *MODBUS Transmission Control Protocol* (TCP)/IP [35].

Este capítulo permitiu abordar conceitos essenciais à realização deste trabalho. Desta forma, foi perceptível que numa micro rede inteligente, com a bidirecionalidade e a PD essencialmente proveniente de fontes renováveis, surge novos desafios. Com isto, e tendo por base o tipo de conexão com a rede de MT, surge a aplicação de métodos como DR. Este controlo da MR pode ser complementado e implementado, através de sistemas inteligentes e flexíveis como o SCADA [7]. Uma vez que os mesmos, demonstram ser uma boa solução para redes com produção distribuída [38].

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia do trabalho realizado, estando o mesmo dividido em 4 subsecções. Na primeira, é feita descrição da MR usada para o estudo, onde são descritas as características gerais dos consumidores e produtores de energia elétrica. Esta MR, servirá de base para que seja emulado um caso de estudo. Os equipamentos usados em laboratório integram a segunda subsecção deste capítulo, onde é explicado o seu funcionamento e controlo. Na terceira subsecção, são apresentadas as interfaces criadas para o controlo dos equipamentos. As várias interfaces serão aqui descritas e representadas, de forma a que se compreenda, da melhor forma, o trabalho realizado. Estas páginas de visualização foram criadas no intuito de controlar de forma individualizada, cada um dos equipamentos presentes no laboratório do GECAD, de modo a poder aproveitar ao máximo o seu potencial. Na última subsecção deste capítulo, é feita uma explicação detalhada acerca do *ramping period*, de forma a que se possa compreender a ideia geral do conceito. Aqui, são também apresentadas as interfaces de controlo associadas à utilização do *ramping period*, nas quais podemos, de forma detalhada, entender o método de funcionamento desta ferramenta.

3.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

O projeto que será estudado consiste numa MR fictícia com elevada integração PD. Esta pequena rede conta assim com vários consumidores e produtores de energia elétrica, todos eles conectados, sendo a rede gerida por um gestor e um controlador. Pretende-se que esta MR seja a representação de aldeias ou pequenas vilas reais, que pretendem reduzir a sua dependência da rede elétrica de distribuição, diminuindo a utilização de recursos limitados, como os não renováveis. Deste modo, como se encontra representado na Figura 3, que é baseada em [39] com alterações significativas, a MR conta com uma PD de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e ainda uma central mini-hídrica como em [40]. Esta MR pretende reduzir a sua dependência da rede elétrica e, para tal, o uso de energias renováveis é essencial, bem como a aplicação de programas DR. Estes, permitirão gerir os consumos, face à produção, em momentos que o défice seja muito elevado, sendo que, para períodos de menor preocupação o abastecimento da MR é garantido pela rede elétrica de distribuição.



Figura 3 Representação da MR em estudo

A população usada neste estudo, apresenta um elevado nível de desenvolvimento e disponibilidade para a inovação, pois apenas desta forma é possível aplicar conceitos, como MR e *smart grids*.

O conceito base deste projeto é o controlo dos consumos, aplicando metodologias de DR e de *ramp period*. Onde é feito um controlo das cargas, quando necessário, antes do evento ocorrer. Cada consumidor deve efetuar um contrato que inclua qual o programa ou programas de DR que se compromete a cumprir. O cumprimento do contrato, resulta numa remuneração mediante o tipo de programa de redução que aplique, em cada período. Um fator determinante é o tempo disponível até que ocorra o evento, pois a grande diferença deste projeto para outros em que se recorre a DR é que, neste caso concreto, qualquer redução dos consumos é feita antes do evento ocorrer. O gestor da rede analisa quais serão os consumos e a produção para o período seguinte, com alguma antecedência. Com base no tempo disponível, serão ativados pelo controlador da rede programas de DR, sucessivamente, até que o consumo iguale a produção. A esta abordagem, pode chamar-se de *ramping period*, quanto maior o tempo de previsão de valores de consumo e produção de energia elétrica, mais eficaz se torna a aplicação deste método. É importante referir que, nesta abordagem, deve ser feita uma redução das cargas, quando o consumo é maior que a produção. No entanto, quando a produção é superior ao consumo, as cargas anteriormente desligadas devem ser ligadas. Cada consumidor é notificado, antes dos seus equipamentos serem desligados, no entanto todo este controlo é bem mais complexo do que isso.

A MR tem como salvaguarda, a central mini-hídrica, que deverá entrar em funcionamento sempre que os programas de DR, não são suficientes para garantir a redução de consumos desejada. Os programas de DR têm um papel fundamental nesta MR, pois são a única possibilidade de se conseguir equilibrar os consumos de energia elétrica da comunidade. Este equilíbrio, permite que se possa fazer o maior uso possível, de energias renováveis, que no caso desta MR, são as únicas fontes de produção de energia elétrica. Deste modo, sempre que os consumos forem superiores à produção de energia elétrica, na MR, são ativados programas de DR, usando *ramping*. Ou seja, é ativado um programa, e se o consumo ainda se mantiver superior à produção, ativa-se o programa seguinte. Esta abordagem é consecutiva até à ativação do terceiro programa de DR. Se, após a ativação do terceiro programa, a produção de energia elétrica ainda não for suficiente para assegurar

os consumos, então, o gerador síncrono da central mini-hídrica deverá entrar em produção. Deste modo, poderá assegurar o défice de produção existente.

A aplicação de programas DR combinada com o *ramping*, apesar de parecer simples, é uma tarefa complexa, muito importante e crítica. É feita uma previsão antes do evento ocorrer, como tal é necessário dar muita atenção ao período anterior ao evento. Essencialmente o último período anterior ao evento, contém muita informação sobre o que poderá ocorrer, desta forma uma avaliação deste período é imprescindível. Esta avaliação, cabe ao gestor da rede, que tem como função gerir e prever consumos e produções de energia elétrica, dando informações ao controlador das ações que deve tomar, mais concretamente quais os programas de DR devem ser aplicados no *ramping*. Cada consumidor, produtor e o gestor da rede, devem estar em comunicação constante, e em tempo real. Deste modo, é possível que o gestor consiga avaliar os vários fatores essenciais ao bom funcionamento da MR. No período em que está a ocorrer a ativação dos programas de DR, o gestor tem de garantir que cada consumidor está a cumprir com o contrato que estabeleceu com o operador. Uma vez há remunerações associadas aos programas, e também para garantir que o *ramping*, irá ocorrer com os consumos certos. Assim sendo, uma gestão em tempo real é imprescindível, para que se possa monitorizar os consumos, as produções e as reduções nos programas de DR.

Definida a ideia base de todo este projeto, para colocar em funcionamento toda esta MR em laboratório, é necessária a utilização de vários equipamentos. Como tal, de seguida, serão apresentados todos os equipamentos, bem como a estrutura da MR emulada em laboratório. Para que tudo funcione da melhor forma possível, o uso de automação nos equipamentos, permitiu um melhor controlo do mesmo, possibilitando a criação da MR, aqui detalhada, da forma mais real e completa possível.

3.2. EQUIPAMENTOS EM LABORATÓRIO E AUTOMAÇÃO

A MR fictícia, anteriormente referida, será agora implementada em laboratório. A implementação no laboratório do GECAD, foi feita com recurso aos equipamentos lá existentes, que estão dotados da capacidade de se conectarem em conjunto formando uma MR. Esta MR é constituída por emuladores de cargas e emuladores de produção de energia elétrica. Os emuladores de cargas, são, uma carga de 30 kW, um grupo de dois motores de 1,50 kW e uma carga por níveis com 4 kW, por nível. Estes equipamentos servirão para

emular o consumo da MR, deste modo, foram também usados equipamentos para emular a produção, todos eles conectados a uma rede. Os equipamentos usados para emular a produção são, um emulador de gerador síncrono, e um emulador de gerador assíncrono, representando a energia hídrica e eólica respetivamente. A estrutura da MR referida em laboratório encontra-se representada na Figura 4.

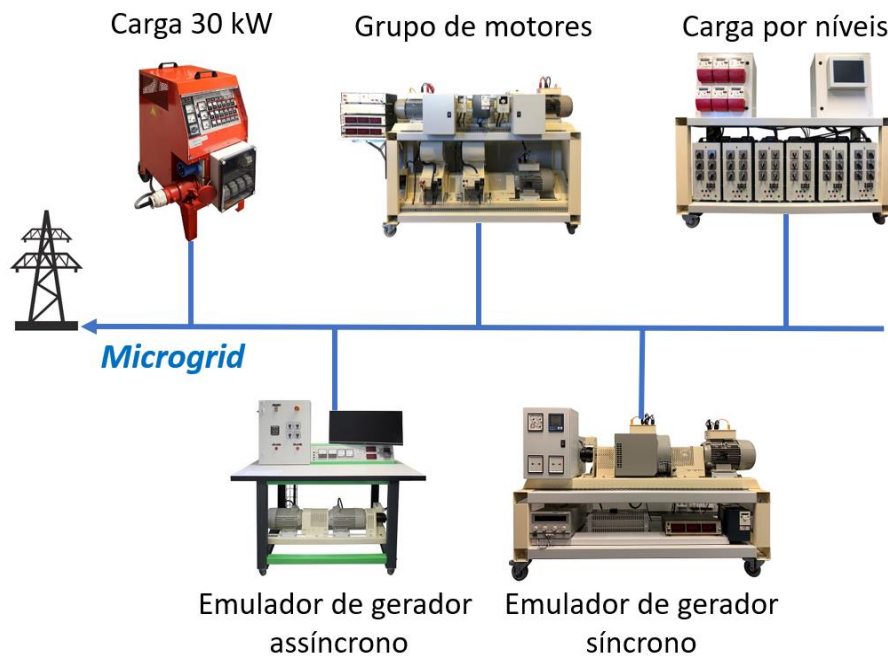


Figura 4 Representação da MR em laboratório

Como se pode confirmar na Figura 4, serão usados cinco equipamentos nesta MR. Deste modo, passaremos então a explicar o funcionamento de cada um dos emuladores.

Carga 30 kW

Este equipamento é utilizado na MR para emular o consumidor comercial. Este, apesar de ter uma potência de 30 kW, apenas é possível fazer o controlo de 10 kW através de um PLC, instalado no mesmo. Este permite o controlo de quatro relés através de saídas digitais, que controlam a carga desejada do equipamento. O PLC encontra-se em comunicação constante com o medidor existente neste emulador, o que permite obter valores em tempo da emulação.

Carga por níveis

Este equipamento é usado na MR para a emulação de habitações residenciais. Esta carga consiste em seis níveis de cargas resistivas, tendo, cada uma, uma capacidade de 4 kW. A

carga está equipada com um PLC, que permite controlar seis relés em cada um dos níveis da carga, totalizando trinta e seis relés, que permitem variar a carga total de 24 kW da carga, conectados a saídas digitais.

Este emulador tem também dois medidores, um para as três primeiras cargas e outro para as restantes três. Estando o mesmo em constante comunicação com o PLC, sendo possível analisar valores reais em tempo real. Para terminar, este equipamento tem também um ecrã no qual se desenvolveu uma interface de controlo do mesmo, como será possível ver mais à frente neste capítulo.

Grupo de motores

Este equipamento é utilizado, na MR, para emular os motores usados para rega. Este, possui uma bancada com dois níveis, estando na parte superior dois motores de indução trifásicos de 1,50 kW com carga constante, e no nível inferior, um motor de indução trifásico de 3 kW com carga variável. Este último tem aplicado no seu eixo um freio elétrico, o que permite variar a carga. Com o PLC instalado neste emulador é possível controlar a velocidade dos motores e do freio, através de saídas analógicas. Para este trabalho, foram apenas usados os dois motores de 1,50 kW, sendo apenas ligados e desligados para obtenção de valores, uma vez que havia limitações no laboratório, referentes ao controlo deste equipamento.

Gerador assíncrono

Este equipamento é usado, nesta MR, para emular as eólicas e é composto por um gerador trifásico indutivo de 1,20 kW, com um motor assíncrono trifásico acoplado. Para emulação, o controlo da velocidade do motor, irá ditar a velocidade do eixo do gerador, permitindo assim controlar a produção do gerador assíncrono. Deste modo, a velocidade do motor irá estar associada à velocidade do vento, pedida ao emulador. Neste equipamento é possível, através de uma saída analógica do PLC controlar a velocidade do vento, e através de uma saída digital PLC controlar a conexão à rede. O PLC encontra-se em comunicação constante com o medidor existente neste emulador, o que permite obter valores em tempo real.

Gerador síncrono

Este equipamento é usado, nesta MR, para emular a central mini-hídrica que se encontra no rio e é composto por um gerador síncrono de 3 kW, com um motor de indução trifásico acoplado. Para emulação, o controlo da velocidade do motor irá ditar a velocidade do eixo do gerador, permitindo assim controlar a produção do gerador síncrono. Para tal, este equipamento está equipado com um PLC. Desta forma, usando duas saídas analógicas, é possível controlar a velocidade do motor de indução, através de um variador de frequência e também controlar a quantidade de corrente contínua (CC), proveniente de uma fonte de alimentação CC, também existente neste equipamento. É possível através de três relés no emulador, que são controlados por três saídas digitais do PLC, ligar/desligar o motor de indução e o variador de frequência do mesmo, conectar/desconectar a fonte CC e um último para o funcionamento isolado ou em rede, do gerador. O PLC estabelece uma comunicação com dois medidores de energia, que permitem assim obter informações sobre a produção de energia, bem como os parâmetros da rede elétrica. Na utilização deste equipamento para emulação, o motor de indução síncrono começa a girar o eixo de gerador, a uma determinada velocidade, até que atinge uma frequência de 50 Hz. Assim que isso acontece, o PLC ativa o relé que conecta a fonte de alimentação CC ao rotor do gerador. O PLC analisa frequência na rede e no gerador, e assim que a frequência da tensão alternada no estator é igual à da rede, é ativado o relé que conecta o gerador à rede. Para atingir este sincronismo, o PLC aumenta ou diminui a frequência do gerador sempre que necessário, até que a diferença entre as tensões seja próxima de zero, a partir deste momento, começa a produzir energia elétrica no emular e injetá-la na rede.

Para cada um dos emuladores referidos anteriormente, foram criadas interfaces de controlo e automação. Para a sua realização, foi utilizado o *software* Saia PG5 2.2. O controlo de cada equipamento é feito através de um PLC, instalado no mesmo, existindo um PLC central que se encontra em comunicação constante com todos os outros instalados nos equipamentos.

A comunicação entre PLC é feita por *modbus communication* em tempo real, permitindo assim que o controlo de toda a rede seja feito pelo *main* PLC (PLC central), e o controlo de cada equipamento, no seu próprio PLC, como é representado na Figura 5 que é baseada em [41] e [42].

Este tipo de comunicação entre os diferentes equipamentos, permite controlos mais simples, como ativar ou desativar um relé, sejam feitos no PLC do próprio equipamento, e ações mais complexas como, o funcionamento de interfaces de simulação de projetos, sejam feitas no *main* PLC, no qual é possível comunicar com todos os outros PLC.

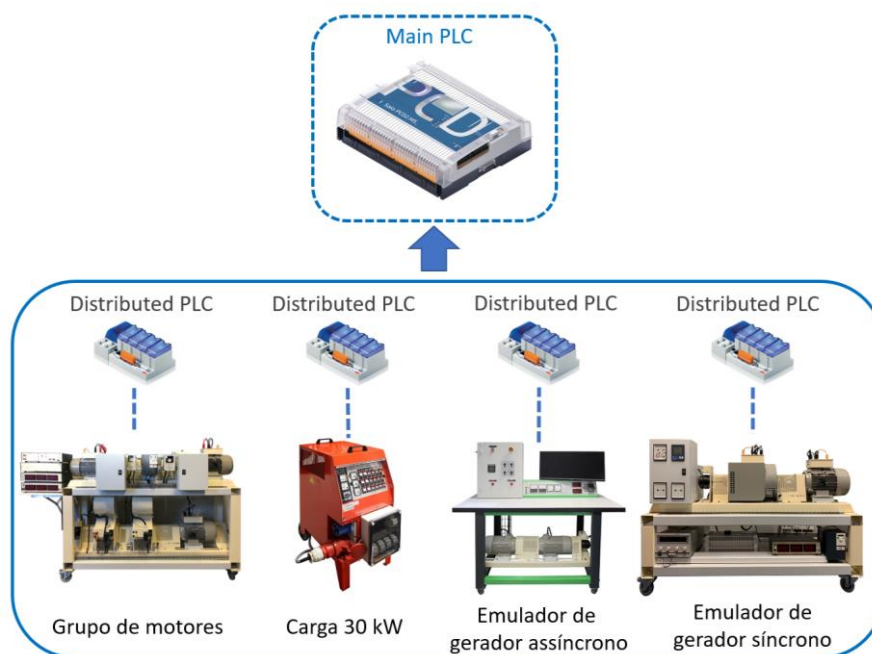


Figura 5 Conexão entre PLC

3.3. INTERFACES DE CONTROLO DE EQUIPAMENTOS

Para permitir o controlo eficaz e intuitivo, foram criadas interfaces para os seguintes equipamentos: uma carga de 30 kW, grupo de motores com dois motores de 1,50 kW e um motor de 3 kW, linhas de transmissão, carga por níveis, uma carga variável de 3 kW, um simulador de gerador síncrono e um simulador gerador assíncrono. Alguns destes equipamentos não estão incluídos na MR, no entanto, no futuro existe essa possibilidade. As interfaces são dotadas de vários *displays* onde é possível observar os valores de tensão, corrente e potência de cada um dos equipamentos, para cada uma das fases que os alimenta. Foram também criadas interfaces associadas ao controlo e simulação de projetos específicos, de forma a que seja possível efetuar simulações e casos de estudo em laboratório, com o auxílio dos equipamentos disponíveis no mesmo.

A criação destas interfaces de controlo, tem como objetivo controlar os vários equipamentos e funcionalidades de forma centralizada. Deste modo, havia a necessidade de incluir todas estas funcionalidades numa página inicial. Assim surge a página de

controlo que mais se destaca, de todas as páginas criadas, o menu inicial, no qual é possível controlar de forma central todos os equipamentos e funcionalidades deste sistema. Como pode ser visto na Figura 6.

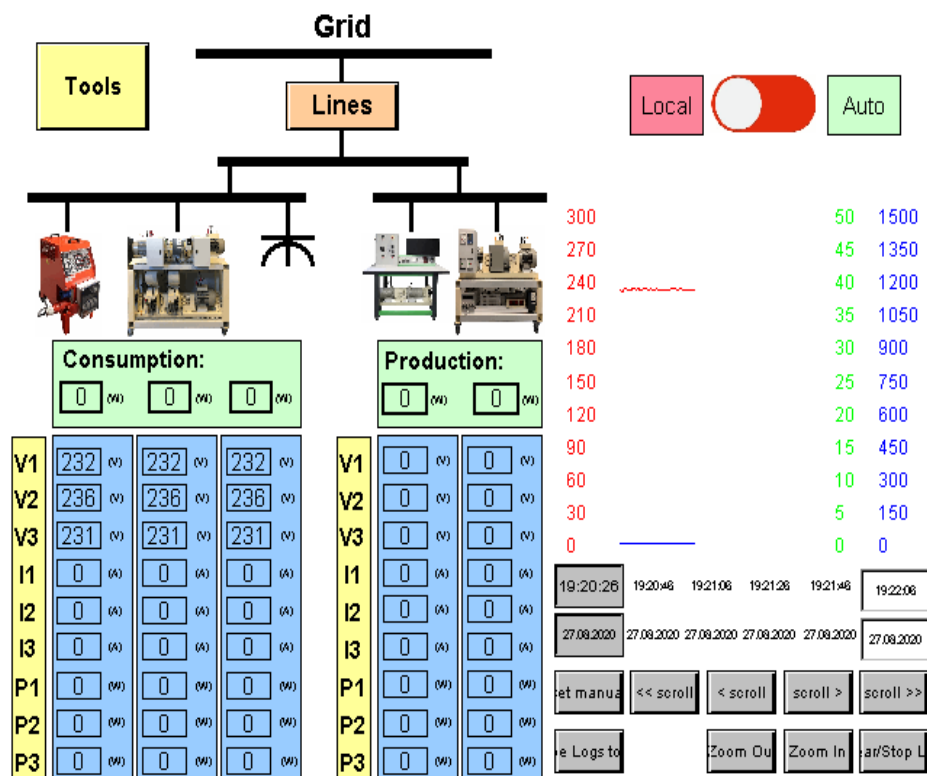


Figura 6 Interface de controlo do menu inicial

É de notar na Figura 6, que esta interface disponibiliza muita informação, e possibilita o controlo de um vasto leque de equipamentos e funcionalidades. Por agora, começamos pela representação da rede existente no laboratório. Esta encontra-se dividida em dois barramentos. Um barramento de consumo, à esquerda, e um barramento de produção, mais à direita. Como é possível verificar, existem dois retângulos verdes, por baixo de cada um dos barramentos, nos quais se pode observar o consumo e a produção, de cada um dos equipamentos, conectado ao barramento, e ilustrado imediatamente acima do mesmo. Clicando sobre cada uma das imagens, é possível aceder aos vários equipamentos que integram esta MR. Nem todos os equipamentos desta rede se encontram conectados, diretamente, ao mesmo PLC. Deste modo, primeiro serão explicadas as interfaces de controlo que integram o *main* PLC, e, de seguida, os equipamentos que possuem um controlo individualizado sem influência do PLC principal.

No barramento de consumos, começamos pela carga de 30 kW, como se pode ver na Figura 7, apenas 10 kW dos 30 kW podem ser controlados por esta interface. Isto, deve-se

ao facto de apenas parte da carga estar equipada com relés de controlo, que estão conectados às saídas digitais do PLC, o que provoca esta limitação no controlo da carga. O controlo deste equipamento pode ser feito de modo automático, ou então, manual. No modo automático é possível escrever no *display* a carga que se pretende atribuir ao equipamento e este, de forma automática, irá controlar os relés e acender as luzes na interface indicando quais os relés ativados. Quando seleccionado o modo manual, o controlo é feito através dos quatro botões que controlam cada relé diretamente. Sempre que um botão é premido, acende a respetiva luz e o *display* mostra o valor de carga do equipamento, sem que seja possível alterá-lo. A interface apresenta na área azul, uma zona com vários *displays*, onde é possível consultar valores em tempo útil enquanto se utiliza o equipamento. As tensões, correntes e potências por fase, bem como a potência total do equipamento, podem ser analisadas. De forma a tornar a página de controlo, ainda mais completa, é possível observar a evolução da potência total do equipamento ao longo do tempo, com recurso ao gráfico que se encontra na parte inferior. A interface conta também com uma imagem do equipamento, de forma a que se possa, em laboratório, facilmente identificar o equipamento.

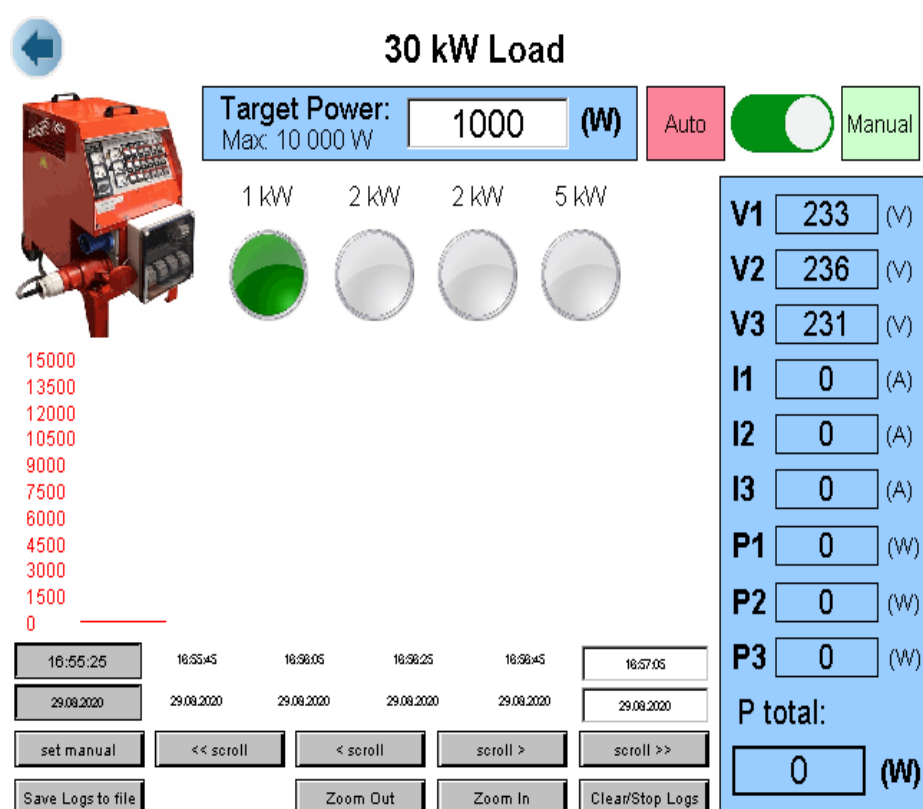


Figura 7 Interface de controlo carga de 30 kW

O próximo equipamento, também ligado ao barramento das cargas, é controlado por duas interfaces distintas. Este equipamento, trata-se de um grupo de motores, que está equipado com dois motores de 1,50 kW, que estão na parte superior do equipamento.

É um motor de 3 kW, que está na parte inferior do equipamento. Na Figura 8, pode ver-se a interface de controlo para os dois motores de 1,50 kW. O controlo de ambos é feito de forma igual, com recurso a um botão, podemos ligar ou desligar o motor. Por baixo botão, encontra-se uma barra na qual é possível aumentar ou diminuir a frequência do motor. Ainda nesta interface, destaca-se a presença de um gráfico onde se pode observar as potências em cada instante dos dois motores. É também de referir os *displays*, onde se pode visualizar os valores indicados referentes a cada motor. É de salientar nesta interface a presença de um botão com a indicação “3kw Motor”, que encaminha o utilizador, para a interface de controlo do motor de 3 kW. Este acesso pode ser feito também, através da imagem.

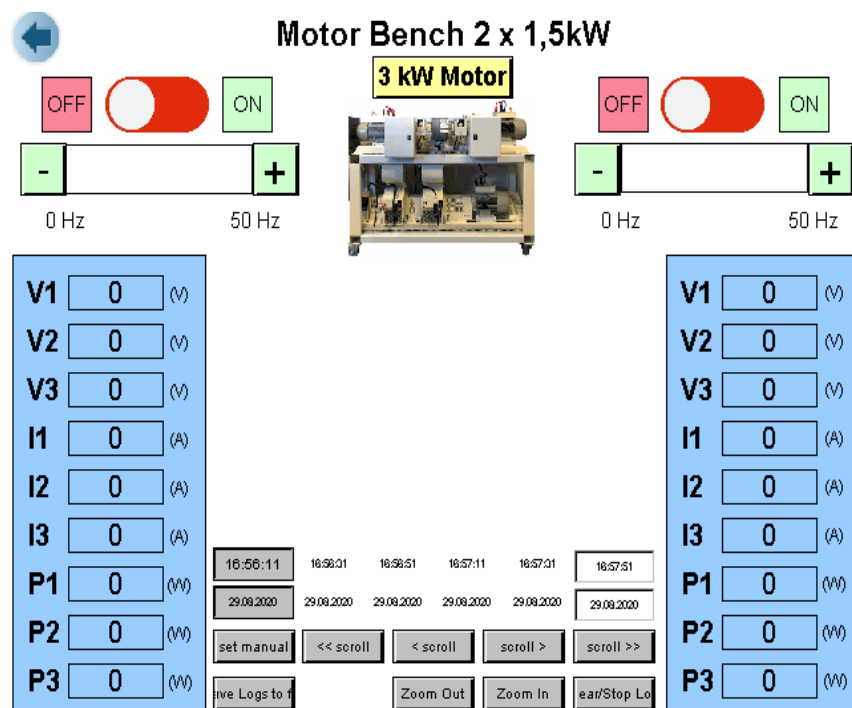


Figura 8 Interface “Motor Bench 2 x 1,5 kW”

Clicando sobre a imagem ou sobre o botão, surge a interface da Figura 9. É notório que a interface de controlo do motor de 3 kW, é muito semelhante com as anteriores. Dada a presença de um gráfico onde se pode analisar a potência e os *displays*, para visualizar informação relevante do motor. O controlo deste motor é feito através de um botão que liga e desliga o mesmo e pode ainda controlar-se a velocidade de funcionamento do motor

através de uma barra que aumenta ou diminui a frequência, à semelhança dos outros motores vistos anteriormente. É de salientar nesta página de controlo, a presença de uma barra na qual se pode controlar o travão elétrico que este motor possui. Este controlo é feito percentualmente, aumentando ou diminuindo a percentagem desejada na barra de controlo associada ao mesmo.

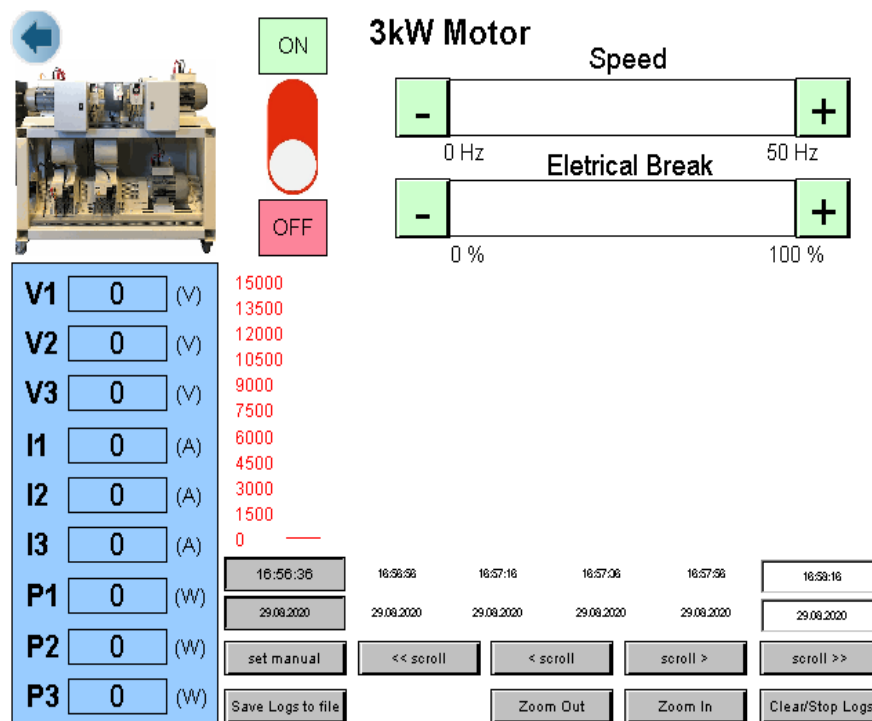


Figura 9 Interface de controlo motor 3 kW

Analizadas assim, as interfaces dos dois equipamentos conectados ao barramento dos consumos e ao *main* PLC. É feita a análise das interfaces nos barramentos das produções da Figura 6. Iniciando, pela interface do emulador assíncrono que se pode ver na Figura 10.

Esta interface serve para analisar e controlo dos parâmetros relativos ao emulador da turbina eólica. Este equipamento, é controlado através de uma saída analógica e uma saída digital, que indicam ao equipamento a potência de funcionamento desejada, e a frequência de ligação à rede, respetivamente. O utilizador pode seleccionar a velocidade do vento que deseja, e automaticamente o emulador ativa o motor, consequentemente o gerador começa a produzir energia elétrica. Ao aceder a esta página, a primeira coisa que surge é um aviso para que se ligue o simulador, uma vez que o mesmo não está equipado para ser ligado automaticamente através da interface. De seguida, deve ser premido o botão cinzento, que permite ligar e desligar o simulador na interface. Este botão, permite que os controlos comecem a funcionar, e tem apenas a função de segurança para o equipamento. Surge um

display quando premido o botão, para que se possa observar e até mesmo controlar a velocidade do vento desejada, inserindo o valor no *display*. Como é possível ver na Figura 10, a velocidade pode também ser controlada pressionando os botões verdes, aumentando e diminuindo a velocidade nos botões, à esquerda e à direita da barra, respetivamente. Como já é recorrente nas interfaces já observadas, esta apresenta também um gráfico onde pode ser observada a potência produzida em cada instante. Nos displays à direita surgem os valores instantâneos referentes a cada uma das grandezas indicadas. Por último, relativamente à interface é de salientar a presença de uma imagem do equipamento a controlar, bem como a presença de um botão no canto superior esquerdo, à semelhança das outras interfaces, que permite voltar para o menu inicial. A programação deste equipamento permite que o mesmo emule a conexão à rede, quando é o caso, e permite também salvar tanto o motor como o gerador que fazem parte do mesmo, em situações de uso indevido das interfaces de controlo. Como, por exemplo, se o utilizador tentar inserir uma velocidade superior à máxima, a interface assume a velocidade máxima. Ou então, sempre que se desligar o simulador mesmo que esteja uma velocidade diferente de 0 m/s, a programação antes de desligar o simulador, reduz a velocidade até que seja seguro para os equipamentos.

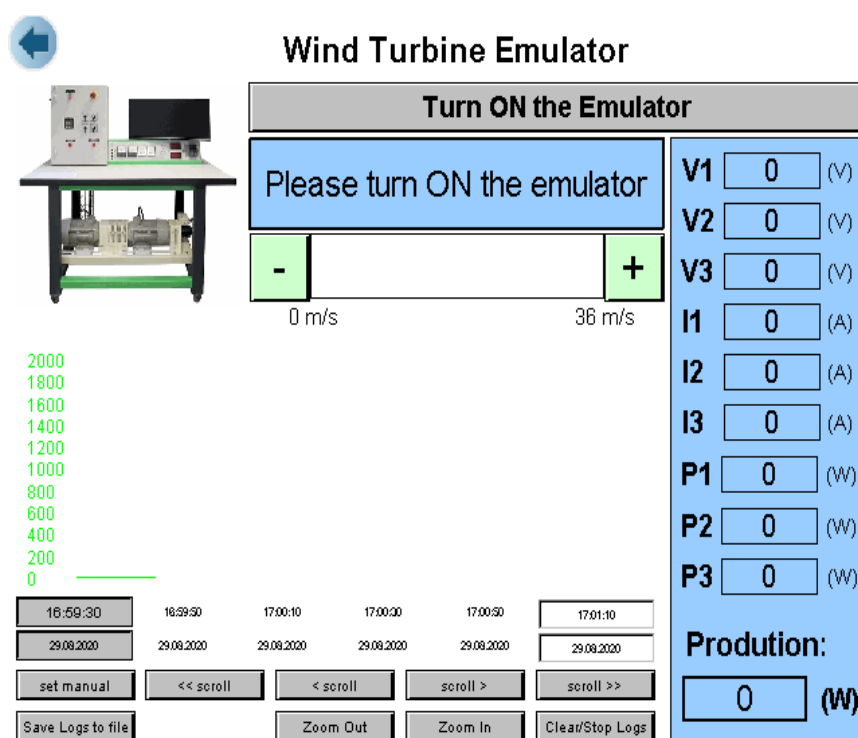


Figura 10 Interface de controlo simulador de gerador assíncrono

Na Figura 11 pode ver-se a interface de controlo do gerador síncrono, que é muito semelhante à anterior. Neste emulador, o controlo é feito através de saídas digitais, e uma saída analógica que controla a tensão de funcionamento, para o sincronismo. Começamos por ligar a máquina no botão cinzento, como no anterior, este equipamento tem programação para salvaguardar a segurança do mesmo, bem como a do utilizador. Como tal, este controlo para ligar e desligar o equipamento nem sempre está disponível, uma vez que, seleccionando a potência que pretendemos produzir, escrevendo no *display* ou então, através da barra que se encontra por baixo deste, o gerador entra em funcionamento. O gerador irá começar a produzir energia eléctrica e quando ocorre o momento de sincronismo irá conectar à rede. Deste modo, se o utilizador tentar desligar o simulador, ele não irá desligar imediatamente. Primeiro irá reduzir a sua produção até ser nula e desconectar da rede, d seguida, há um ligeiro tempo de pausa definido para garantir que tudo ocorre em segurança. Assim, se o utilizador tentar ligar e desligar de imediato o simulador, ou então ligá-lo logo após o ter desligado, o mesmo não vai responder, por segurança. É de destacar a presença de um gráfico onde se poderão observar a potências produzida ao longo do tempo, bem como os *displays* onde podem ser observadas as diferentes grandezas.

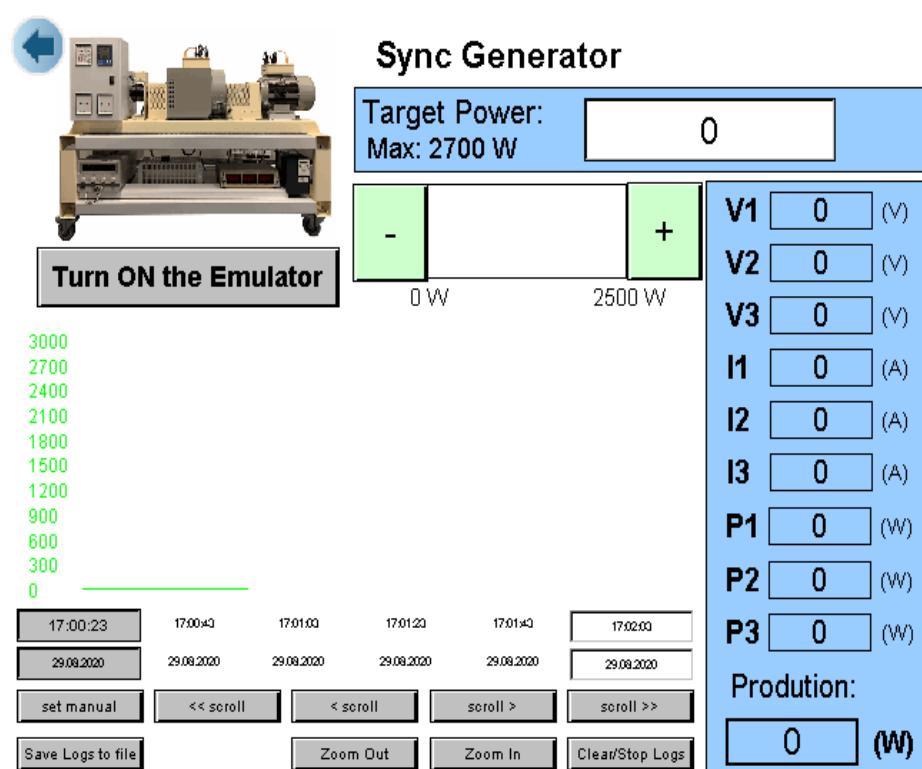


Figura 11 Interface de controlo simulador do gerador síncrono

Terminando assim a análise ao barramento das produções, na Figura 6, referente ao menu inicial surge a opção “Lines”, esta reencaminha-nos para uma interface de controlo, que controla as linhas de transmissão como mostra a Figura 12.

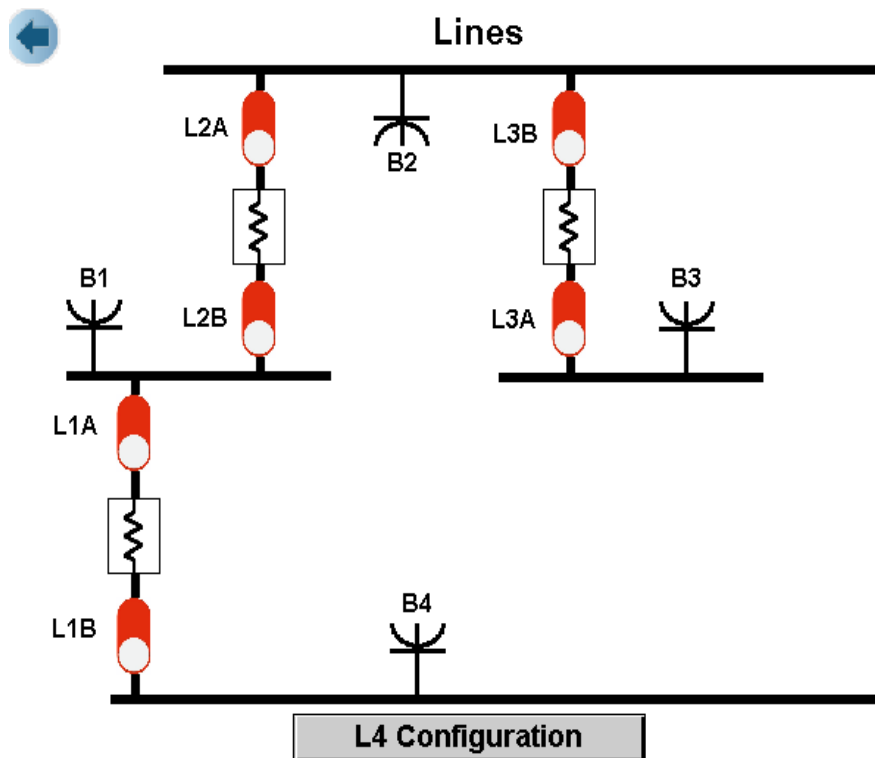


Figura 12 Interface de controlo *Lines*

Nesta página, é possível ativar os vários relés de controlo de cada linha, quatro no total, sendo que três se encontram sempre ativos e há a possibilidade de selecionar o tipo de configuração da linha quatro, que por defeito, se encontra desligada. Para proceder à ligação dos relés basta clicar sobre o relé que se pretende ligar. Deste modo, o mesmo deixará de apresentar o tom avermelhado (desligado), e surgirá a cor verde (ligado), indicando assim que a linha se encontra ligada. Este procedimento repete-se para todas as quatro linhas do sistema.

No caso da linha quatro, a mesma pode ter três tipos de configurações as quais podem ser selecionadas em “L4 configuration”. Quando pressionado este botão, surge uma nova página, como a da Figura 13. Nesta página de seleção de tipo de configuração de linha quatro, a seleção é feita, clicando sobre a imagem da configuração que pretendemos escolher. Premindo o botão “OK”, automaticamente a configuração da linha quatro, surge junto das restantes três linhas.

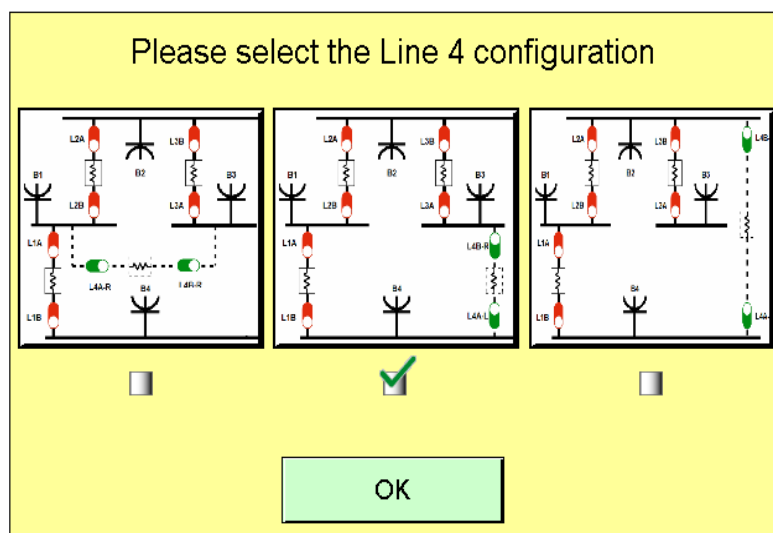


Figura 13 Interface de controlo L4 configuration

Ainda na interface destinada às linhas de transmissão, Figura 12, é possível para cada linha, pressionando o botão com formato de resistência, aceder a uma nova página. Este botão encontra-se entre os dois relés da linha, havendo um botão deste tipo para cada uma das três linhas. Nesta página, existem vários *displays*, os quais indicam várias informações sobre o estado da linha que seleccionamos, como é possível ver na Figura 14.

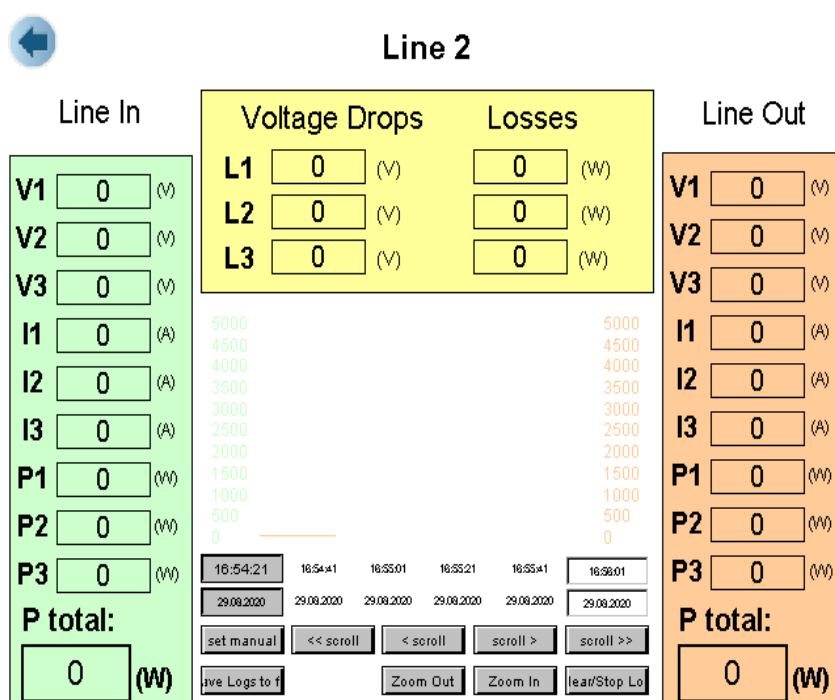


Figura 14 Interface de informação sobre a linha 2

Neste caso específico, a imagem é referente à linha dois. No entanto, para todas as linhas existe uma página semelhante a esta com informação sobre a respetiva linha, incluindo a

linha 4, assim que escolhida a configuração. À esquerda, na imagem, encontram-se os parâmetros referentes à entrada da linha, no interior de um retângulo verde, e, na direita, referente à saída da linha, no interior de um retângulo com tons acastanhados. Na zona central, surge no interior do retângulo amarelo, os valores referentes às quedas de tensão, bem como às perdas, para cada uma das fases. É de notar também a presença de um gráfico na zona central da página. Neste, é possível observar a potência ao longo do tempo, para a entrada e para a saída da linha. Esta página, bem como as semelhantes criadas para as outras linhas, tem apenas a função de informar o utilizador sobre o estado da linha, uma vez que, não é possível efetuar qualquer tipo de controlo. Apenas podem ser consultados os valores referentes à linha, ou o gráfico, como se pode ver na Figura 14.

Como já referido, na Figura 6, é possível aceder aos barramentos de consumos e produções bem como às linhas de transmissão. É ainda possível acompanhar a evolução dos mesmos, com o recurso a gráficos e *displays* de valores. Na zona de *displays* podem ser observados os parâmetros de cada equipamento, como as tensões, correntes e potência por fase e os mesmos encontram-se dispostos em colunas. Cada coluna indica as informações referentes ao equipamento que surge imediatamente acima da mesma. Nestes, é possível obter informações relativas à tensão, corrente e potência em cada uma das fases, de cada equipamento. Relativamente ao gráfico, é possível consultar informações sobre o sistema ao longo do tempo, como consumos e produções de energia elétrica em toda a MR.

Até agora, foram referidos todos os equipamentos que se encontravam conectados a um desses barramentos e também tinha ligação direta com o PLC principal. Como é possível ver na Figura 6, existe no barramento dos consumos, o símbolo de uma tomada. Clicando sobre ele, somos reencaminhados para uma nova página, onde se encontram os equipamentos da MR que não têm ligação direta com o *main* PLC. Este controlo foi criado, para que seja possível incluir neste sistema, outros equipamentos que possuam PLC próprio e não estejam integrados nesta interface. Estes equipamentos têm a particularidade de possuírem um *display* físico só para eles, como tal, foram integrados neste sistema de forma indireta. Ou seja, todas as interfaces até aqui têm como objetivo serem aplicadas em apenas um dispositivo que permite controlar todos os equipamentos referidos. Como tal, e de forma a tornar o sistema mais eficaz, acrescentou-se esta possibilidade de num ecrã único, ser possível aceder a ecrãs de controlo de outros equipamentos. Deste modo, todo o sistema fica mais completo e facilita, o uso de todo o sistema em conjunto, pelos

utilizadores. Quando se abre a interface da tomada, clicando sobre a mesma, surge uma nova página. Nesta, pode escolher-se entre dois equipamentos lá representados clicando sobre a sua imagem, como se verifica na Figura 15. De momento, apenas se encontram dois equipamentos representados, no entanto há a possibilidade de colocar novos equipamentos e atualizar esta interface.



Figura 15 Interface de seleção de carga externa

No equipamento mais à esquerda, pode ver-se na Figura 16, a interface de controlo da carga variável.

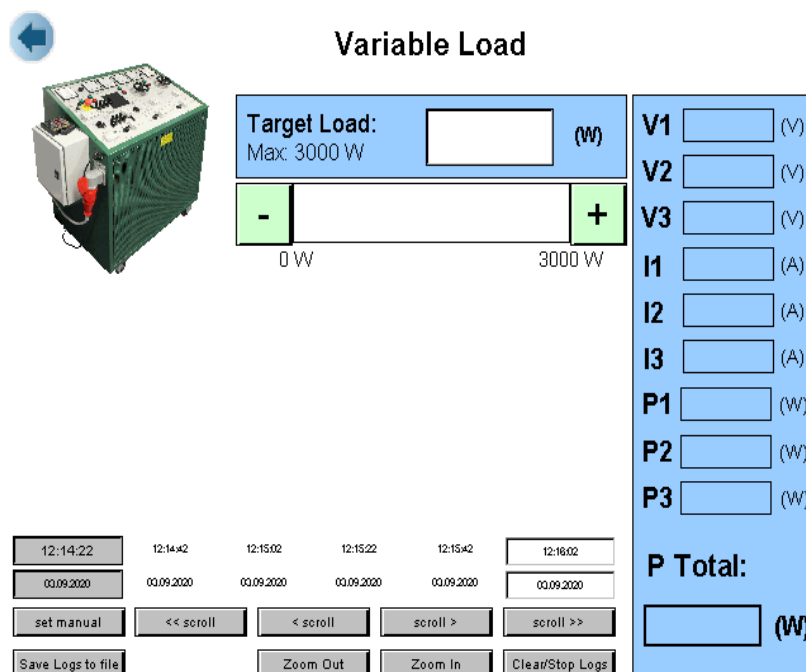


Figura 16 Interface de controlo da carga variável

Este equipamento de momento ainda não está operacional, uma vez que ainda é necessário instalar o PLC e o *display*. No entanto, a interface de controlo foi criada, para ser carregada no mesmo assim que possível. Esta interface conta então com um gráfico, onde se pode visualizar a potência a cada instante. À semelhança das outras interfaces, a presente na Figura 16, esta também apresenta os *displays* onde se pode obter informações como a tensão, corrente e potência por fase. Relativamente à parte de controlo da carga, a mesma pode ser seleccionada com recurso ao *display*, escrevendo o valor desejado, ou então, com recurso à barra, aumentando e diminuindo como desejado o valor de carga, com uma limitação de 3 kW.

Quando seleccionada na Figura 15, a carga por níveis, somos reencaminhados para a interface de controlo própria, desta carga. Esta interface pode ser consultada também, através do ecrã que se vê na Figura 17.

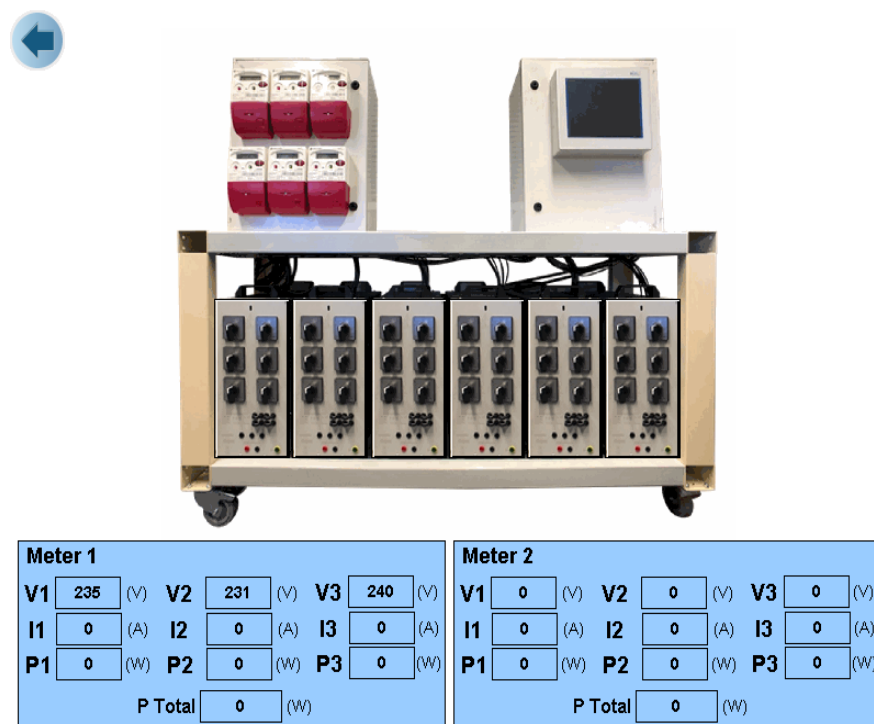


Figura 17 Interface de controlo da carga por níveis

Esta carga apresenta vários níveis, seis no total, como se pode ver na parte inferior do equipamento. Nesta interface inicial, é possível aceder a cada um dos seis níveis, bem como observar os valores de tensão, corrente e potência de cada nível. Estes valores são fornecidos por dois medidores, sendo que os níveis um, dois e três da carga estão ligados ao medidor um, uma carga em cada fase. E no caso dos níveis quatro, cinco e seis, estão ligados ao medidor dois, novamente um em cada fase, como se pode verificar nos

retângulos azuis. Na Figura 18, pode ver-se a interface de controlo do primeiro nível da carga. Para cada um dos seis níveis ou cargas, existe uma interface idêntica a esta na qual se pode efetuar o controlo desse nível. Para aceder a esta interface, basta clicar na carga que pretendemos controlar, sendo a carga mais à esquerda a número um, e assim respetivamente. O controlo de cada nível da carga pode ser efetuado em modo manual, no qual podemos escolher um valor percentual clicando sobre os respetivos botões, do lado esquerdo da página. Nesta opção, o valor da carga selecionada irá ser apresentado no *display*, mas não pode ser editado. Quando desligada a opção de modo manual, o controlo deve ser feito escrevendo o valor de carga desejado no *display*, com um limite de 4 kW. Deste modo, o controlo da carga através dos botões não é possível, no entanto as luzes que indicam a percentagem da carga que está ativada, irão acender. Como se pode ver na Figura 18, está a ser simulada uma situação com o modo manual desligado, em que se definiu no *display* a potência máxima deste nível. Como se pode observar, todas as luzes encontram-se acesas, totalizando 100% da carga ativada. Ainda nesta interface, é possível observar a tensão, a corrente e potência nos *displays*, bem como os mesmos valores em cada instante, no gráfico.

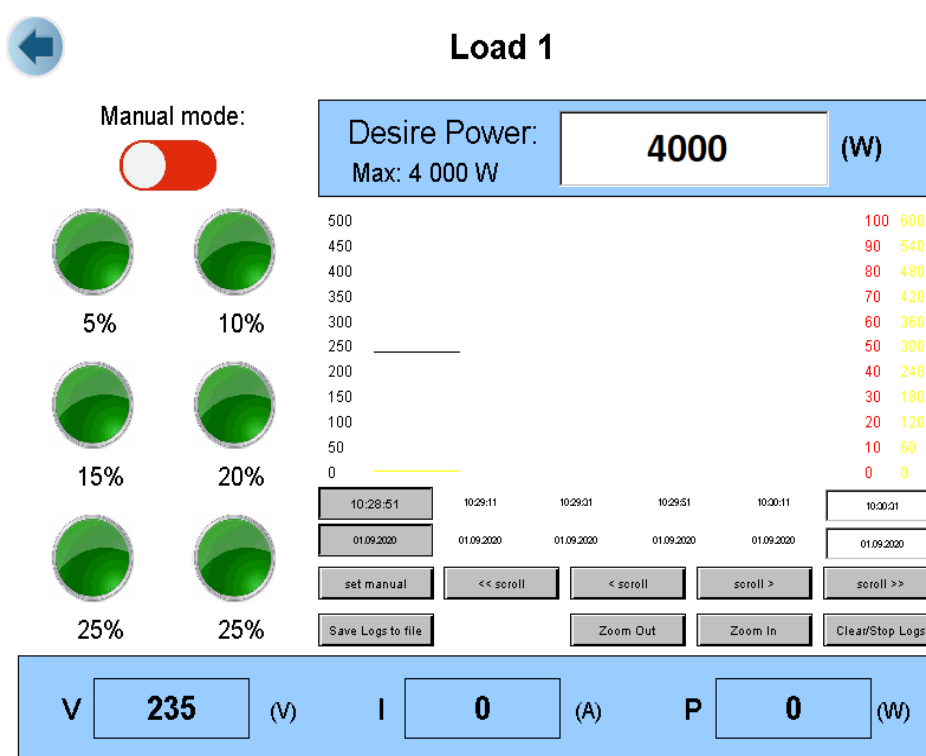


Figura 18 Interface de controlo do nível 1 da carga

As interfaces até aqui apresentadas, destinam-se ao controlo de diversos equipamentos. Cada uma delas, até de forma muito semelhante, permite o controlo e a análise de valores

associados ao funcionamento da máquina, de forma intuitiva e prática, o que permite uma facilidade de controlo dos equipamentos em laboratório. O conjunto de todos os equipamentos referidos nesta subsecção e na subsecção anterior, conectados numa MR, como referido, permitem recriar em laboratório a MR fictícia, definida no início deste capítulo. Desta forma, para que seja possível emular em laboratório um caso de estudo, que será definido no próximo capítulo, é necessário criar interfaces para que se possa emular o projeto. Neste caso concreto, pretende-se utilizar metodologias de ramping com o uso de programas de DR. Assim sendo, a criação das interfaces seguintes é fundamental para este trabalho.

3.4. IMPLEMENTAÇÃO DE PROGRAMAS DE *DEMAND RESPONSE IN RAMPING*

Após a apresentação do projeto e descrição dos equipamentos em laboratório, é necessário explicar o conceito base deste projeto. Como já referido, serão usados programas de DR aplicados usando *ramping*, de forma a que seja possível reduzir os consumos. Todo este trabalho, incluindo a Figura 19, é uma extensão do trabalho em [3], sendo, o conteúdo deste método adaptado.

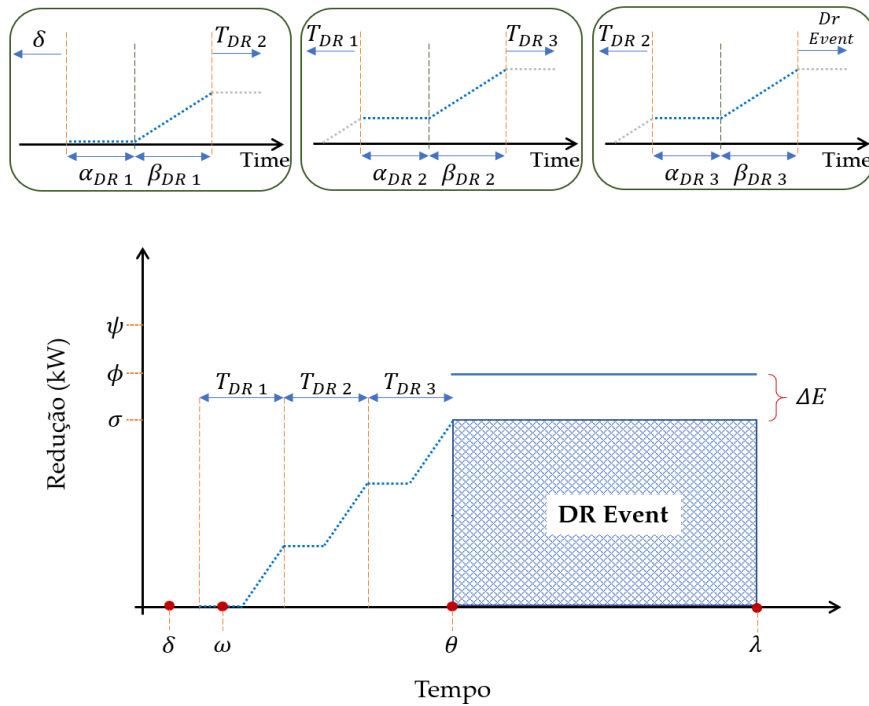


Figura 19 *Ramping Period*

Na Figura 19, é de notar que este método é dependente de duas variáveis, o tempo e a redução. Relativamente à redução necessária em cada período, o valor máximo de redução

que será pago pelo gestor (ψ), é referente à potência máxima que o gestor da rede está disposto a pagar em cada período. O valor base de redução (σ), indica o valor mínimo necessário a reduzir aos consumos. Sendo então a margem de erro da previsão (ΔE), a margem entre o valor de base e o valor de base de redução previsto (ϕ). O evento de DR pode ocorrer, quando a capacidade de redução disponível, é superior ao valor base de redução.

O evento pode também começar, através do tempo disponível até ao evento ocorrer, ou seja, o prazo de redução (θ). Quando atingido este momento temporal o evento tem de ocorrer. Para tal, surge o prazo de anúncio (δ) que indica a última oportunidade do gestor da rede de notificar o controlador. Sendo, ponto de partida (ω) o momento a partir do qual o controlador pode, com base da capacidade de redução disponível, iniciar o evento. Aqui surgem então os tempos de duração de cada programa de DR T_{DR1} , T_{DR2} e T_{DR3} . Estes, representam a duração de cada programa de redução, estando divididos em dois tempos diferentes, o tempo de notificação específico para cada programa de redução (α_{DR}), e o tempo necessário para atingir o valor de redução desejado (β_{DR}). Para cada um dos três programas existe um tempo de notificação e um tempo de atuação do programa de redução. Assim que se inicia o evento de DR, resta apenas esperar que se atinga o fim do evento (λ), os consumidores são obrigados a manter a redução de cargas prevista até este momento. Para que o evento ocorra, devem ser usados os programas de DR já referidos, mas desde que o valor necessário de redução seja atingido, não é necessário que se usem todos os programas. Se ao fim do primeiro programa de DR (DRP1), for atingido o valor pretendido de redução, deve diretamente avançar-se para o evento de DR. O mesmo deve ocorrer sempre que aplicando DRP1 e o segundo programa DR (DRP2), o valor de redução desejado seja atingido.

Explicado assim o método, prosseguimos com a interface que foi criada no âmbito de aplicar este método em laboratório. No canto superior esquerdo da Figura 6, em “Tools”, podemos seleccionar o projeto que se deseja usar. Neste caso concreto, como pode ser visto na Figura 20 surge apenas “Ramping”, ou seja, o projeto ao qual, este documento se baseia, a redução de cargas por níveis (*ramping period*). Esta página foi criada na perspetiva de que no futuro, possam ser incluídos novos projetos e simulá-los sem que seja necessário a criação de novas interfaces. Por agora, uma vez que esta interface de controlo se destina apenas a este projeto, somente existe uma opção de escolha disponível.

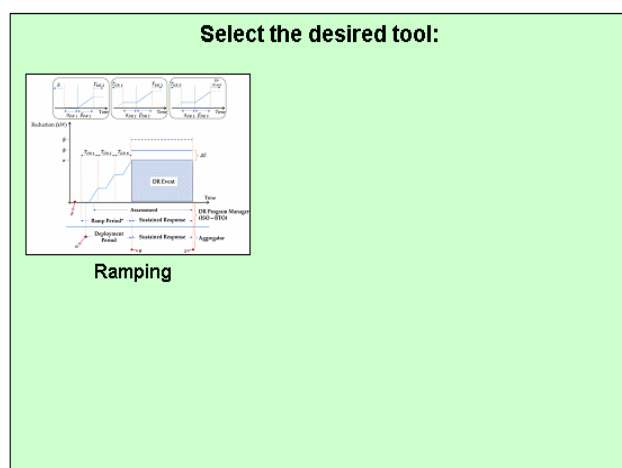


Figura 20 Interface de controlo “Tools”

Na Figura 6, no canto superior esquerdo encontra-se um botão de controlo, possibilitando a escolha entre duas opções, controlo local ou automático. O mesmo possibilita que o utilizador possa escolher o modo como pretende operar. Em modo local, todos os equipamentos podem ser controlados de forma individualizada, sendo apenas necessário clicar sobre a imagem do equipamento que se deseja controlar e efetuar a sua parametrização. É importante salientar que, podem estar em funcionamento vários equipamentos ao mesmo tempo, sendo apenas necessário repetir o processo para todos os equipamentos que se deseja utilizar. Ou então, quando selecionada a opção de controlo automático poderá simular um projeto, neste caso concreto, o *ramping period* recorrendo aos equipamentos da MR. A interface de controlo do projeto de *ramping period* é, ligeiramente, diferente de todas as outras que, até aqui, foram apresentadas. Nesta interface e em modo local, é simulado um demo, onde é possível definir para simulação todos os parâmetros indicados. Clicando sobre os mesmos, surge uma janela *pop-up*, na qual é possível escrever o valor desejado, bem como ler uma pequena explicação sobre o parâmetro. Nesta interface, é também possível escolher o valor de produção desejado para realizar a simulação. Assim que todos os parâmetros estão definidos, o utilizador deve premir “Start” e dá-se início à simulação do *ramping period*. Ao longo da simulação, vão surgindo indicações luminosas, de forma a indicar ao utilizador a fase em que se encontra a simulação. A parametrização da simulação é idêntica, caso se trate de uma simulação demo, ou então, de uma simulação com recurso aos equipamentos da MR.

Na Figura 21, pode ver-se o aspeto visual da interface quando estamos em modo automático, que é muito semelhante ao aspeto em modo local. Assim como, o

funcionamento desta é muito semelhante à do modo local, com apenas o surgimento de um novo botão “*Consumption*”. Este, encaminha o utilizador para a interface da carga por níveis (Figura 17) ou, para a interface da carga de 30 kW (Figura 7), onde o utilizador pode escolher o consumo que deseja simular. Esta interface permite simular um *ramping period*, usando os equipamentos da MR, sendo apenas necessário definir o consumo, como já referido, a produção de energia elétrica, bem como todos os restantes parâmetros como será possível ver de seguida.

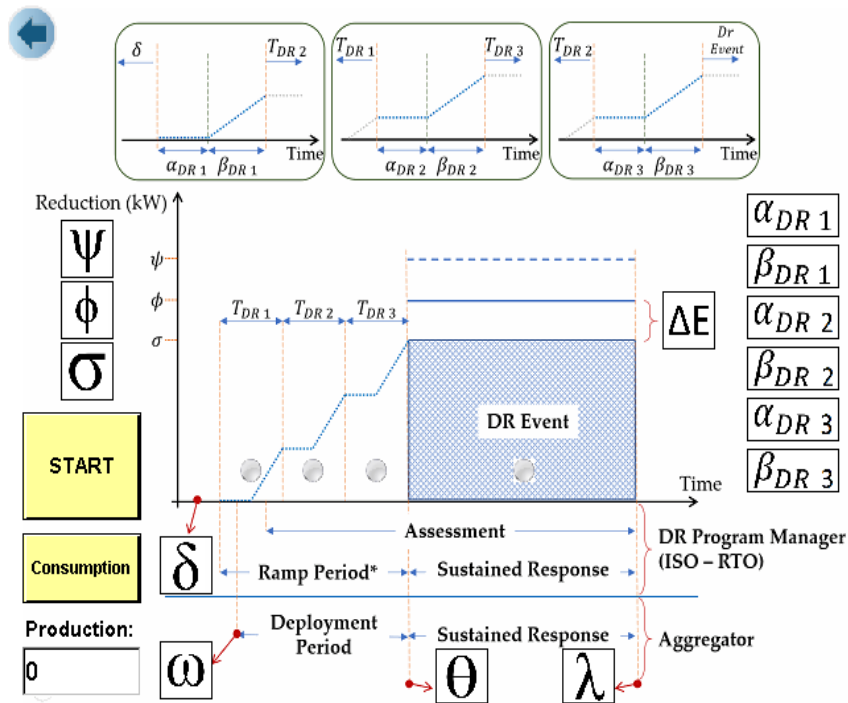


Figura 21 Interface de controlo do *ramping period* em modo automático

Do lado esquerdo da interface, é possível selecionar a parametrização referente à redução de consumos, que será efetuada. Clicando sobre cada um dos três parâmetros irão surgir janelas *pop-up*. Neste projeto em concreto, a definição de valores de redução é dependente dos equipamentos usados, como tal, serão apenas detalhados os parâmetros usados. Este primeiro parâmetro (Ψ) é referente ao valor máximo de redução, que será pago pelo controlador da rede. O segundo parâmetro (Φ), representa o valor base de redução prevista. O terceiro, representa o valor base de redução (σ), sendo este o valor mínimo necessário de redução entre os três programas de DR. Para terminar os parâmetros referentes a valores de redução, o valor de margem de erro da previsão base da redução (ΔE). É de acrescentar que existe uma janela *pop-up* para cada um dos parâmetros indicados. Terminando a

Na Figura 22, a parametrização do valor de aviso de início de evento (δ), à esquerda, e a parametrização do ponto de início do *ramping period* (ω), à direita.

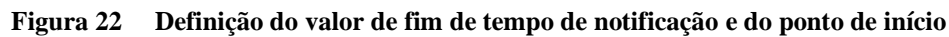


Figura 23 Definição do valor do tempo de notificação e de resposta do programa

4. CASO DE ESTUDO

Descrita toda a metodologia do trabalho, é possível prosseguir para o caso de estudo. No presente capítulo, será descrito o trabalho realizado para o caso de estudo deste projeto que foi inspirado em [3]. Aqui, encontram-se informações gerais sobre o caso de estudo. O perfil de consumo, o tipo de programas de DR e o período a que será aplicado o *ramping*, são algumas das informações que constituem este capítulo.

A MR em estudo é composta por trinta consumidores e vinte produtores reais. No entanto, para este caso de estudo, apenas foram emulados oito consumidores, sendo eles: seis habitações residenciais, um consumidor comercial e motores elétricos para rega. Foi ainda considerada a disponibilidade de duas fontes de energia renováveis, as eólicas (emulador assíncrono) e a central mini-hídrica da MR (gerador síncrono). Na Figura 25, é possível ver consumo total e de produção desta MR. O perfil de consumos e produções é referente a um dia, com intervalos de cinco minutos. É de notar na Figura 25, que até perto das 16h, a produção de energia elétrica toma valores próximos dos do consumo. Neste período, a MR é alimentada pela rede de distribuição, uma vez que a diferença entre a oferta e a procura é reduzida. Ainda neste período, surge um intervalo no qual a produção é superior ao consumo. Dada a indisponibilidade de fontes de armazenamento na MR, essa energia é injetada na rede de distribuição. É possível entender também, que com o aproximar do fim do dia, e após um pico dos consumos, os mesmos diminuem significativamente, voltando a

MR a ser alimentada pela rede de distribuição. Deste modo, para os restantes períodos deste dia em estudo, onde os consumos são muito superiores à produção, será necessário recorrer a programas de DR.

Como já referido, o perfil de consumos apresentado é referente a um dia, no qual foi selecionado apenas um intervalo para serem aplicadas as metodologias apresentadas. Isto, deve-se às limitações técnicas das infraestruturas do laboratório. Assim sendo, o tempo de emulação foi reduzido dada a incapacidade de correr um dia inteiro. Para tal, definido o intervalo desde as 18h30 até às 21h55 como se pode ver na Figura 25. Este período, será emulado na MR do laboratório aplicando os programas de DR em *ramping*, sendo que as cargas têm capacidade de aplicação de programas de DR, e as fontes de energia renovável estão sempre disponíveis com exceção da central mini-hídrica, que serve de fonte de reserva neste período. É ainda de salientar que este perfil, é o perfil do dia seguinte da MR, ou seja, o gestor da rede tem a informação um dia antes, sendo possível gerir os consumos e, reduzi-los de forma a assegurar o abastecimento elétrico, através das fontes renováveis da MR. Como se pode ver na Figura 25, são usadas três fontes de energia renovável, sendo que a energia eólica e a fotovoltaica são usadas na totalidade sempre que disponíveis.

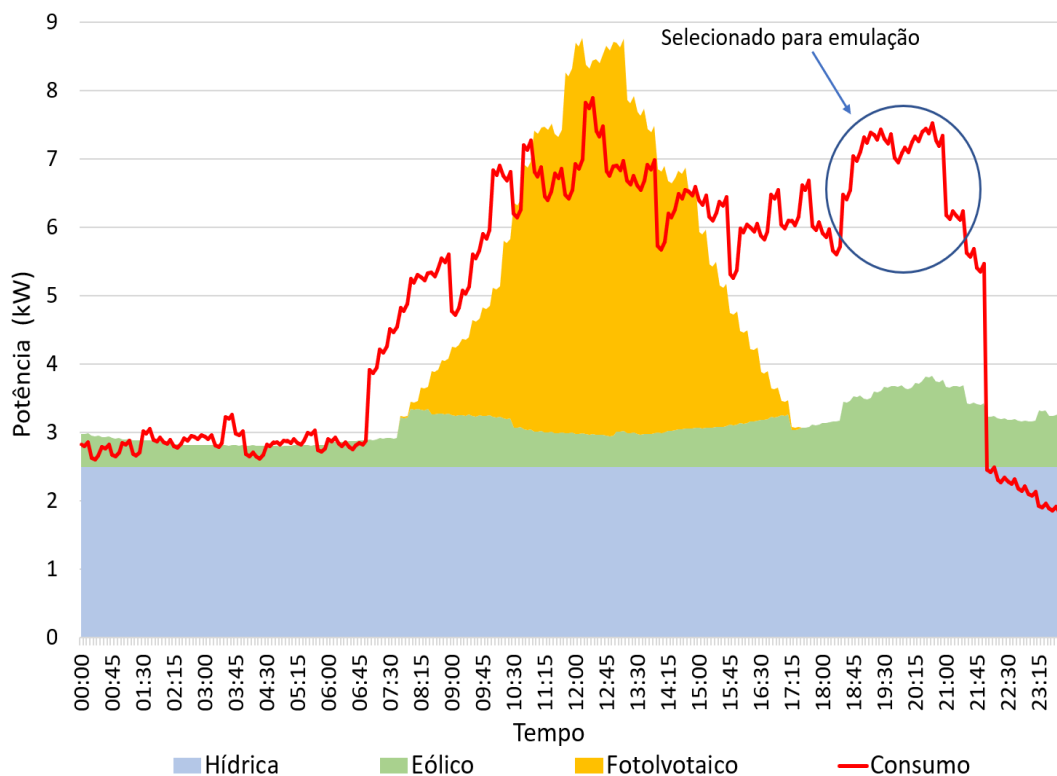


Figura 25 Perfil de consumo e produção da MR

A energia hídrica, como já referido, apesar de estar sempre disponível é apenas usada apenas em situações de necessidade. Ou seja, neste intervalo em estudo, é dada a prioridade a outras fontes de energia, bem como aos programas de DR, sendo apenas usada a energia proveniente da central mini-hídrica em último recurso, para se fazer o ajuste final entre a produção e o consumo. Privilegia-se, essencialmente, o uso de fontes de energias que não podem ser controladas, como vento e o sol, com a garantia que a energia hídrica está sempre disponível, para suprir os consumos.

Deve ser feita, uma análise aos consumos para perceber a necessidade de redução que se pretende que ocorra. Na Figura 26, pode ver-se com maior detalhe o intervalo escolhido para emular no laboratório, onde se farão as reduções. O foco principal de emulação, está localizado entre as 18h30 e as 21h55, incluindo assim quarenta e dois períodos. Na Figura 26, observarmos que a redução máxima pretendida na MR, ronda os 5,50 kW. Deste modo, 4 kW serão provenientes dos programas de DR e os restantes 1,50 kW serão assegurados pelo gerador síncrono. Uma vez que o mesmo funciona como reserva, o gestor da MR deve usá-lo em situações críticas. Com uma redução dos consumos nessa ordem, já é possível através das energias renováveis da MR, garantir o abastecimento de energia elétrica.

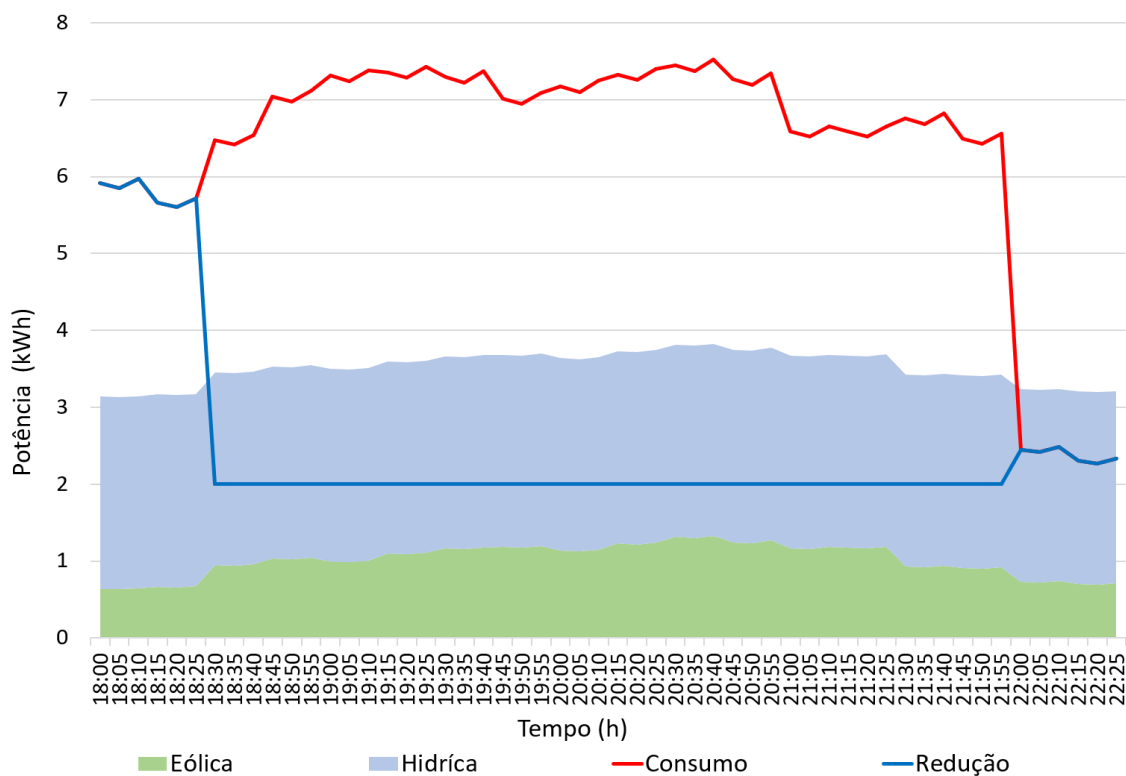


Figura 26 Perfil de redução pretendido

De forma a que se possa atingir a redução de consumos desejada, os programas de DR devem ser previamente acordados com cada consumidor. Cada consumidor negocia com o gestor da rede, a capacidade de redução de cargas que está disposto a cumprir, de forma voluntária, ou então, dando a liberdade ao gestor da rede de reduzir o consumo de forma direta. A cada tipo de redução está associada a uma remuneração, bem como aos consumidores a que se destina. Há um tempo de notificação do consumidor antes do evento ocorrer. Nesta MR serão emulados oito consumidores, sendo seis consumidores subscritores do programa DLC T1, um consumidor subscritor do programa DLC T2 e ainda um consumidor subscritor do *Interruptible Demand Response Program* (IDRP). Na Tabela 1, pode verificar-se a existência dos três programas de DR. No primeiro, DLC T1 o controlador da rede pode de forma direta, controlar equipamentos do consumidor residencial, aumentando e diminuindo os consumos do mesmo de acordo com a produção existente. Para tal, o consumidor deve ser notificado cinco minutos antes, e remunerado com cinco cêntimos por kWh, dando assim o controlo dos seus equipamentos ao controlador da rede. Para o programa DLC T2, o funcionamento é idêntico ao referido para o programa anterior, variando apenas que este se destina a consumidores comerciais, com uma remuneração de seis cêntimos por kWh. Por último, o programa IDRP é de regime voluntário e remunerado a três cêntimos por kWh. Este programa, destina-se a motores de rega, os quais devem voluntariamente ser desligados, assim que o consumidor for notificado.

Tabela 1 Tipos de programa de redução de carga

Tipo de DR	Obrigatório/ Voluntário	Controlo	Remuneração	Tipo de Consumidor	Tempo de notificação
IDRP	Voluntário	Notificação de redução	0,03 €/kWh	Motores de rega	30 min
DLC T1	Obrigatório	Direto ao equipamento	0,05 €/kWh	Residência habitacional	5 min
DLC T2	Obrigatório	Direto ao equipamento	0,06 €/kWh	Consumidor comercial	5 min

Uma vez definidos os programas de DR, na Figura 27, pode observar-se o valor total de capacidade de DR disponível. Este valor é considerado como a capacidade de redução de

cargas ao longo do dia, de cada programa. Cada um dos três programas tem representada no gráfico, a sua capacidade de redução para cada período do dia. Comparando com os consumos ao longo do dia, é notório que há períodos com capacidades muito baixas de redução, no entanto outros com capacidades significativas, um pouco à semelhança da oscilação dos consumos. Quanto maior o consumo, maior a carga disponível para se poder reduzir. É importante referir também, que a área a branco entre a linha do consumo e da capacidade de redução, é referente a cargas não controláveis que não podem ser controladas pela MR. É possível ver também que, no período selecionado para emulação, a capacidade de redução disponível, através dos programas de DR, é sempre superior à capacidade necessária, os 4 kW.

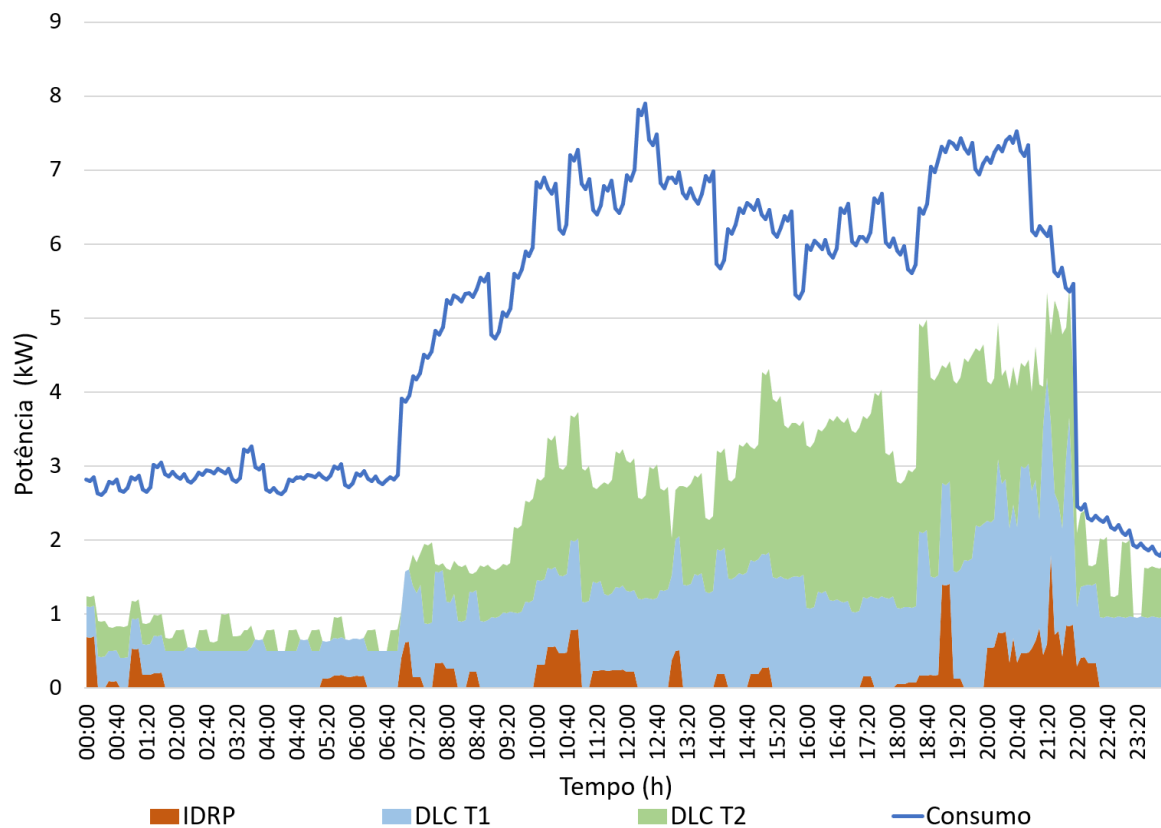


Figura 27 Capacidade de redução de cargas

Este caso de estudo permitirá fazer um ajuste nos consumos, em intervalos do dia em que estes sejam muito superiores à produção. A ligação com a rede de distribuição, irá assegurar o défice entre as produções e os consumos nos restantes períodos. No intervalo em estudo, a aplicação de programas de DR irá reduzir os consumos, sendo usada a central mini-hídrica como reserva. Ou seja, se necessário, esta poderá aumentar a sua produção neste intervalo garantindo o equilíbrio final entre as produções e consumos, assegurando

assim a redução desejada. Para cada período do dia, como é possível verificar, há uma disponibilidade de redução de cargas através de programas de DR, que varia de acordo com os consumos. Esta capacidade deve ser tida em consideração, para que seja possível efetuar a redução disponível. Com isto, prossegue-se para a implementação do caso de estudo em laboratório, para que se seja possível obter resultados.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados e as descrições dos testes realizados, no âmbito do caso de estudo. O mesmo encontra-se dividido em duas subsecções, nas quais se diferenciam os testes aos equipamentos de forma individualizada e os testes ao conjunto da MR. Na primeira parte, cada um dos equipamentos de laboratório é testado e é analisado o seu funcionamento, bem como, a velocidade de resposta do mesmo. Na segunda parte deste capítulo, são apresentados os resultados da MR para o caso de estudo referido no capítulo anterior.

5.1. VALIDAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDIVIDUALIZADOS

A MR em estudo, como já referido é composta por vários equipamentos. Nesta subsecção, para cada um dos equipamentos utilizados em laboratório, é apresentado o resultado do teste individual realizado ao equipamento. Deste modo, será possível prever qual será o comportamento do equipamento na MR, garantindo assim o bom funcionamento da mesma para realização do caso de estudo. Prossegue-se então para os resultados dos testes.

CARGA DE 30 kW

O primeiro equipamento, a serem apresentados os resultados, é a carga de 30 kW. Este equipamento como já referido apenas permite um controlo de 10 kW pela metodologia apresentada.

A realização do teste deste equipamento, teve uma duração aproximada de cinco minutos, sendo observada a tensão, corrente e potência ao longo deste período. Para tal, foi aumentada, com intervalos de um minuto a potência requisitada à carga. Como se pode ver na Figura 28, a tensão nas três fases do equipamento mantém-se com pequenas oscilações, como seria de prever, com exceção ao período entre minuto 2:50 e o minuto 4:35. Nesse intervalo é possível perceber que há uma queda de tensão mais significativa, uma vez que se atingem potências mais elevadas nessa altura, como se pode ver de seguida. É de notar também que essa variação ocorre nas três fases, recuperando para valores próximos dos iniciais, no final do teste, uma vez que a potência é reduzida para 0 kW nesse momento.

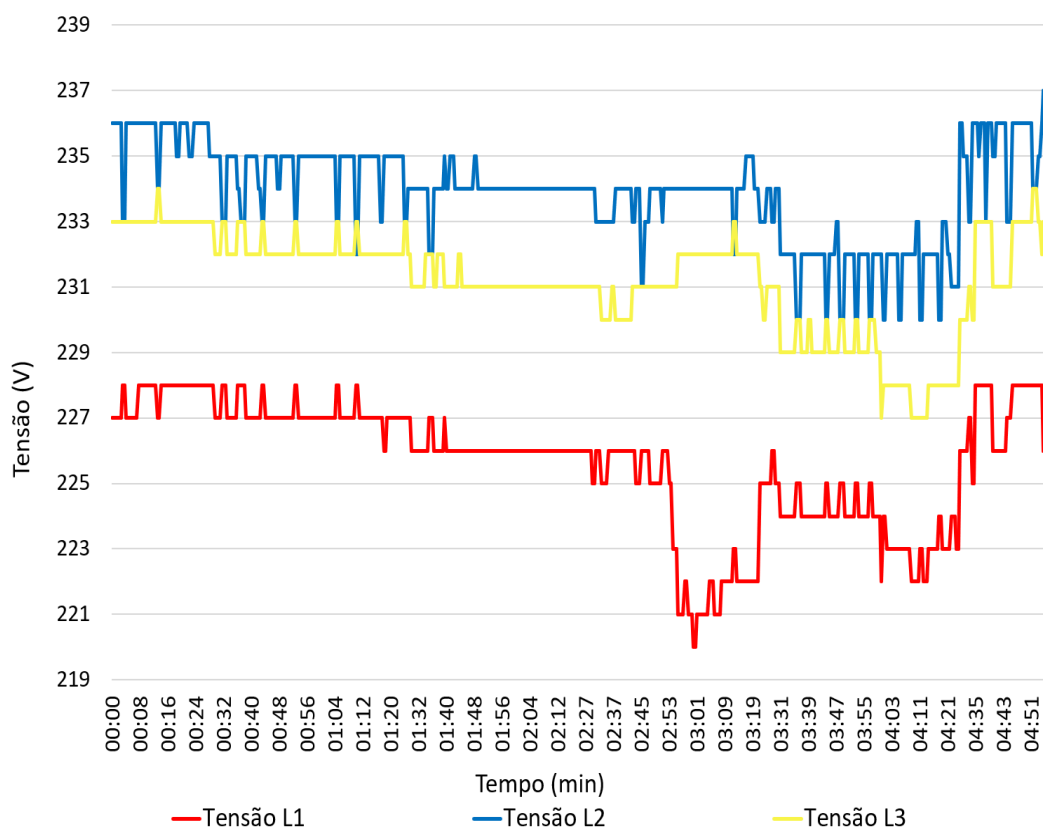


Figura 28 Análise da tensão para a carga de 30 kW

Na Figura 29, é apresentada a corrente em cada uma das três fases, para o teste realizado à carga de 30 kW. Como era expectável, as correntes mantêm-se constantes e de acordo com

a potência requisitada ao equipamento. É possível ver também que, a corrente na fase um e na fase três apresentam um perfil igual, havendo uma diferença na corrente da fase dois a partir do minuto 1:30, até à fase final, onde é reduzida a potência do equipamento, para 0 kW.

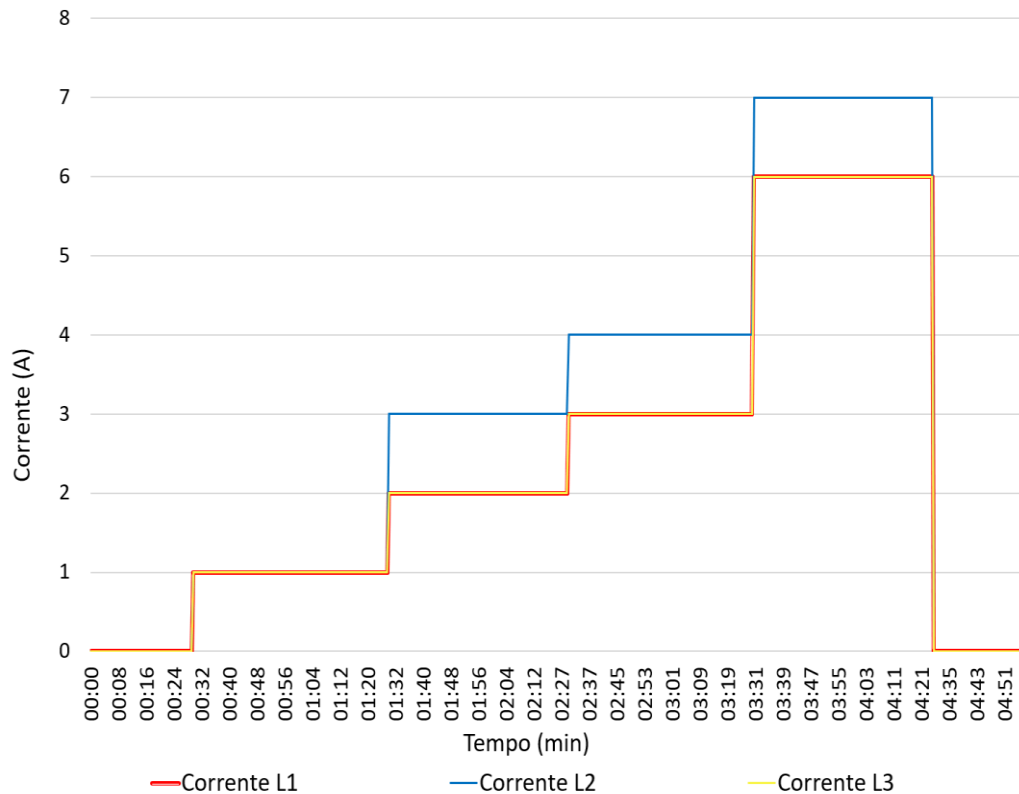


Figura 29 Análise da corrente para a carga de 30 kW

Na Figura 30, é possível observar as potências por fase, a potência total do equipamento, bem como o valor teórico, que é referente à potência requisitada ao equipamento. Como é notório, a potência na fase dois tem um comportamento semelhante à corrente na fase dois, como já era previsto após a análise do gráfico das correntes. É possível perceber que durante os primeiros trinta segundos de simulação, não é requisitada qualquer potência ao equipamento, mas ainda assim, o consumo não é nulo. Isto deve-se à ventoinha de refrigeração da carga, no instante em que se liga o equipamento, mesmo que a 0 kW de potência desejada, o mesmo já se encontra com um consumo a rondar os 0,20 kW referentes à ventoinha. De seguida, de minuto a minuto, são requisitadas ao equipamento potências de 1 kW, 2 kW, 3 kW e 5 kW, voltando a zero na parte final, e mais uma vez se verifica o consumo da ventoinha de refrigeração. Observamos, que para cada um dos níveis de potência pedidos ao equipamento, a resposta a nível temporal é bastante rápida, não há um atraso, o que é benéfico para o estudo que fazemos. Por outro lado, com o

aumentar da potência desejada, pode ver-se que o valor teórico e o valor real da potência total, tomam caminhos diferentes. A potência total fica aquém do valor desejado, a partir do momento que esse valor se aproxima dos 2 kW. É ainda mais notória essa diferença, quanto maior é a potência que requisitamos ao equipamento. Pode também notar-se que a partir desse mesmo momento, as potências na fase um e fase dois, deixam de ter valores próximos, surgindo uma ligeira diferença entre elas. Este será outro indicador a ter em conta nas simulações da MR. O primeiro é que quando se julga que a potência total é nula, e surge um valor associado às ventoinhas de refrigeração. O segundo, é aquele que se vê agora, para valores superiores a 2 kW a potência requisitada ao equipamento, não se traduz na totalidade, na potência total do mesmo.

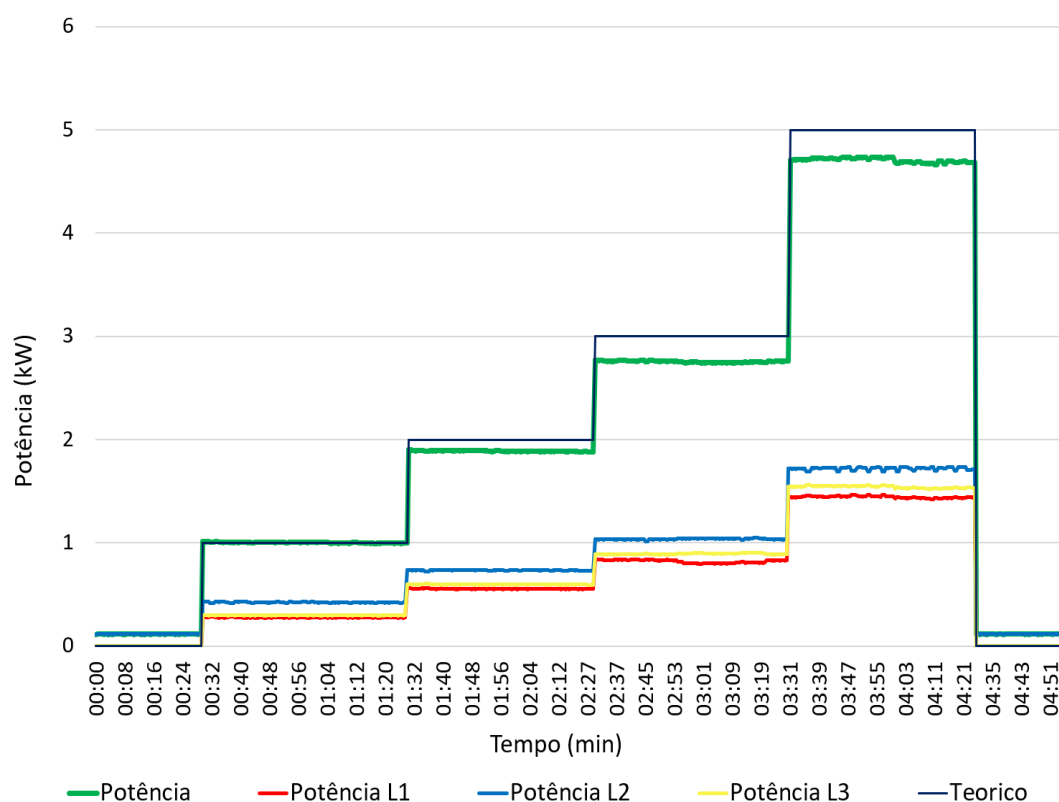


Figura 30 Análise da potência para a carga de 30 kW

GRUPO DE MOTORES

Este equipamento, apresenta algumas diferenças relativamente ao anterior. O grupo de motores é constituído por dois motores, como tal foram testados de forma individual cada um dos motores sendo, de seguida, testados em conjunto. A apresentação dos resultados, será feita da mesma forma que a realização dos testes, sendo primeiro apenas com o motor um. Este equipamento, dadas as limitações em laboratório foi apenas testado ligando e

desligando, ou seja, dos 0 Hz aos 50 Hz e vice-versa, uma vez a impossibilidade de variar a frequência de outra forma. A realização do teste deste equipamento, teve uma duração aproximada de um minuto e dez segundos, sendo observada a tensão, a corrente e a potência ao longo deste período. Para tal, foi ligado o motor, esperou-se a estabilização da potência, e contabilizado um período de trinta segundos com o equipamento com consumos estáveis. Como se pode ver na Figura 31, a tensão nas três fases do equipamento mantém-se com oscilações significativas essencialmente na fase um. Estes valores, devem-se essencialmente ao período de arranque do motor que, como se pode observar, provoca oscilações na corrente e na potência.

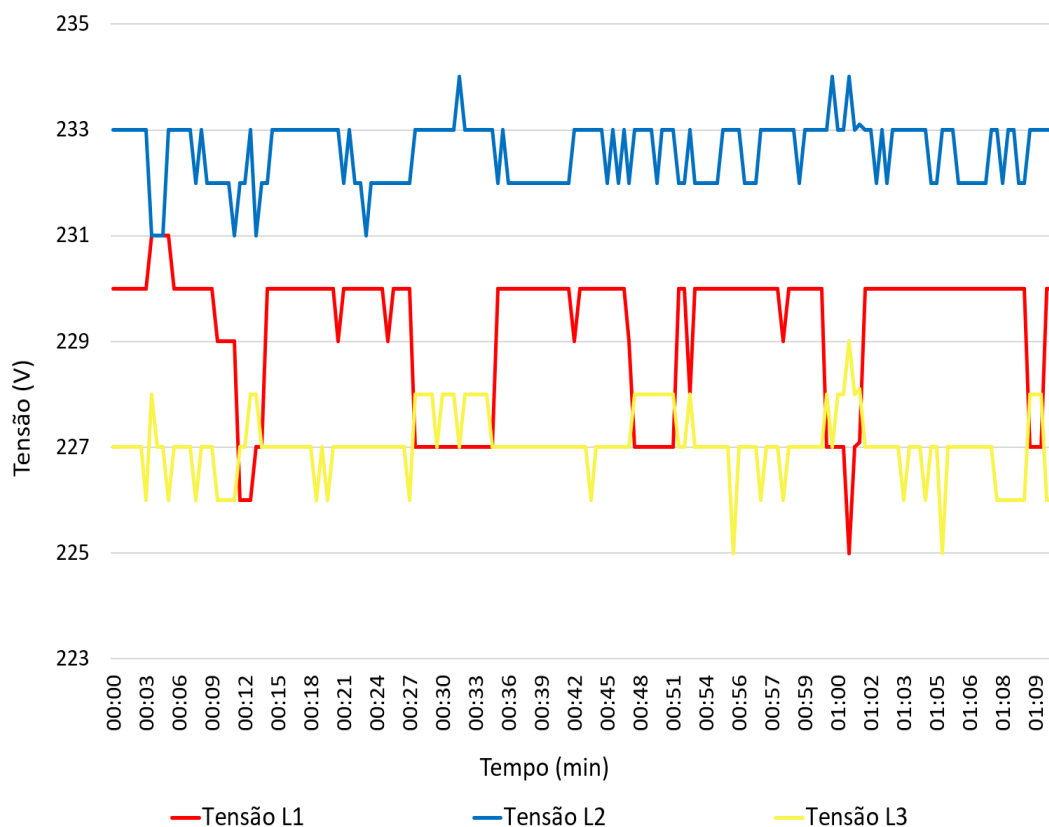


Figura 31 Análise da tensão para motor 1

Na Figura 32, é apresentada a corrente em cada uma das três fases, para o teste realizado ao motor um. Como se pode observar, quando se liga o motor, como era expectável, ocorre um pico de corrente, que é significativamente superior na fase dois. É também de notar um ligeiro pico, próximo do minuto um da simulação, que corresponde ao momento após o motor ser desligado. No intervalo entre estes dois picos de corrente, o motor encontra-se em funcionamento com uma potência estabilizada. O valor da corrente em cada fase é muito baixo face à escala do gráfico, mas não é de 0 A como parece por análise ao gráfico.

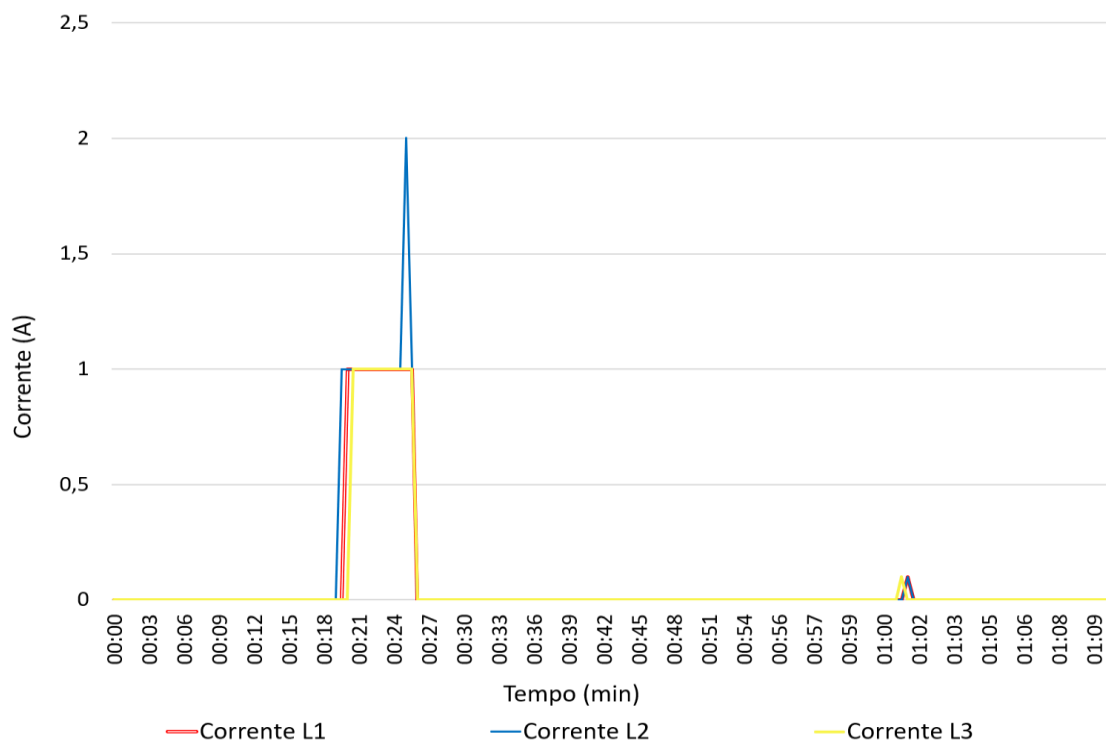


Figura 32 Análise da corrente para motor 1

Na Figura 33, é possível observar as potências por fase, e a potência total do equipamento, não existindo neste caso uma linha respetiva ao valor teórico.

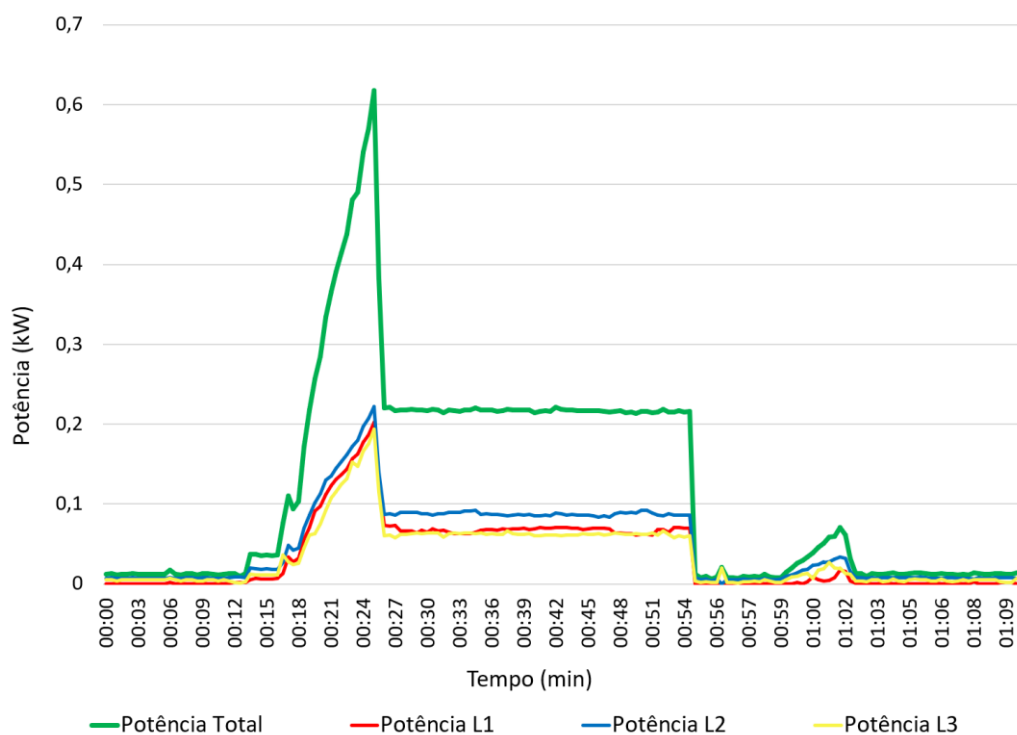


Figura 33 Análise da potência para motor 1

Como é notório, as potências nas três fases têm um comportamento muito semelhante, e como já era de prever após a análise do gráfico das correntes, há uma ligeira superioridade na potência da fase dois. É possível perceber que durante os primeiros quinze segundos de emulação, o motor ainda se encontra desligado, no entanto já há algum consumo residual a ser contabilizado. O mesmo acontece nos últimos quinze segundos da emulação, nos quais o motor já não se encontra em funcionamento. Assim que os consumos estabilizam, a potência total do motor aproxima-se dos 0,22 kW. É também de notar que assim que se desliga o motor, a descida da potência é mais demorada uma vez que esta carga não é puramente resistiva. Uma vez apresentados os resultados do motor um, prossegue-se para o segundo motor. Este equipamento, dadas limitações em laboratório foi apenas testado ligando e desligando o mesmo, ou seja, dos 0 Hz aos 50 Hz e vice-versa, uma vez a impossibilidade de variar a frequência de outra forma, à semelhança do anterior. A realização do teste deste equipamento, teve uma duração aproximada de um minuto e dez segundos, sendo observada a tensão, corrente e potência ao longo deste período. Para tal, foi ligado o motor, esperou-se a estabilização da potência, e contabilizou-se um período de trinta segundos com o equipamento com consumos estáveis. Como se pode ver na Figura 34, as tensões nas três fases do equipamento mantem-se com oscilações significativas, essencialmente na fase um, onde ocorre uma redução significativa

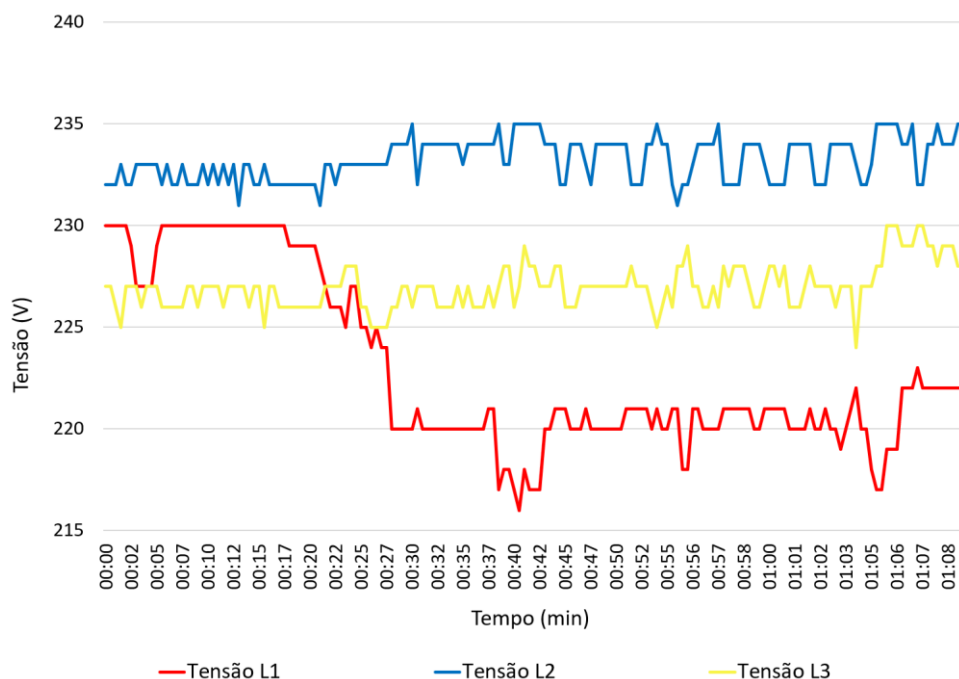


Figura 34 Análise da tensão para motor 2

Na Figura 35, é apresentada a corrente nas 3 fases, para o teste realizado ao motor dois.

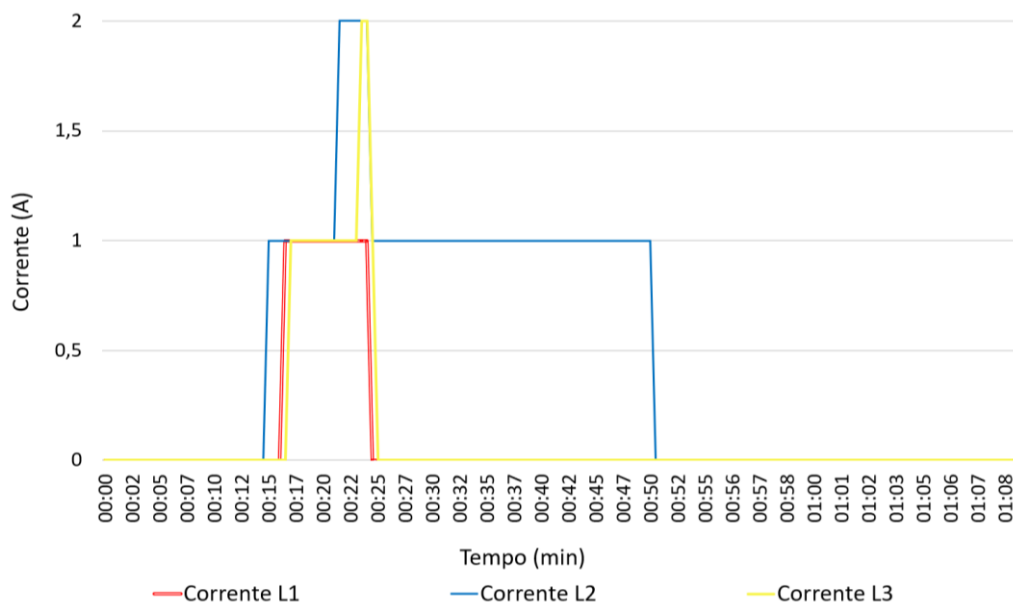


Figura 35 Análise da corrente para motor 2

Como se pode observar quando se liga o motor, como era expectável, ocorre um pico de corrente, que é significativamente superior na fase dois. Há também ligeiro pico próximo do minuto um da simulação, que corresponde ao momento após o motor ser desligado. No intervalo entre estes dois picos de corrente, o motor encontra-se em funcionamento com uma potência estabilizada. O valor da corrente em cada fase é muito reduzido face à escala do gráfico, no entanto não é de 0 A, como pode até iludir na análise ao gráfico. Na Figura 36, é possível observar as potências por fase, a potência total do equipamento.

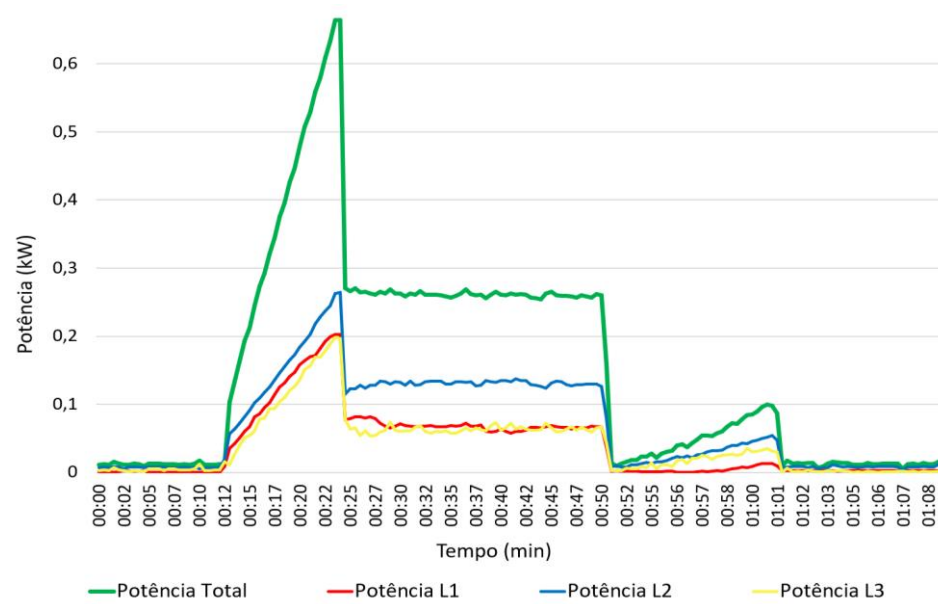


Figura 36 Análise da potência para motor2

Como é notório, as potências nas três fases têm um comportamento muito semelhante, como já era prever após a análise do gráfico das correntes. Há uma ligeira superioridade na potência da fase dois. É possível perceber que durante os primeiros quinze segundos de emulação, o motor ainda se encontra desligado, no entanto já há algum consumo residual a ser contabilizado. O mesmo acontece nos últimos 15 segundos da emulação, nos quais o motor já não se encontra em funcionamento. Assim que os consumos estabilizam, a potência total do motor aproxima-se dos 0,28 kW. É também de notar que assim que se desliga o motor, a descida a potência já não é tão rápida como na carga de 30 kW, uma vez que esta carga não é puramente resistiva, exatamente como se observava no motor um. Uma vez apresentados os resultados do motor um e do motor dois, prossegue-se para os dois motores em conjunto. A realização do teste destes equipamentos, será igual aos testes individuais, respeitando as mesma condicionantes, sendo que os dois motores serão tratados como um só. A duração do teste é, aproximadamente, de um minuto e dez segundos, sendo observada a tensão, a corrente e a potência ao longo deste período. Para tal, foram ligados os motores, ao mesmo tempo, esperou-se a estabilização da potência, e foi contabilizado um período de trinta segundos com os equipamentos com consumos estáveis. Como é possível observar na Figura 37, a tensão nas três fases dos equipamentos mantem-se com oscilações significativas essencialmente na fase um.

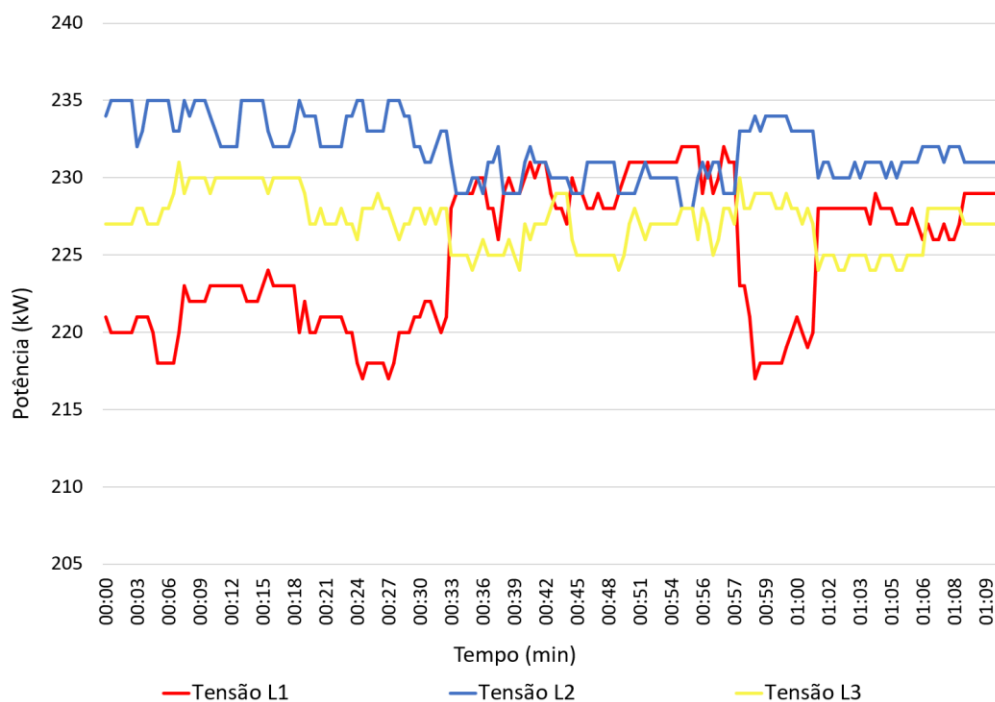


Figura 37 Análise da tensão para os 2 motores

Estes valores devem-se essencialmente ao período de arranque dos motores que, como se pode ver provoca oscilações na corrente e na potência. Com os dois motores em funcionamento é notório um ligeiro aumento nas tensões da fase dois e fase três, e uma diminuição na fase um, sendo que após o período de arranque há uma ligeira diminuição das tensões nas fases dois e três, e um aumento significativo na fase um. Quando os motores são desligados, a tensão na fase um volta a descer significativamente, voltando a valores normais. Verifica-se que estas oscilações de tensão nos motores rondam os 10 V, como tal não têm grande impacto na rede.

Na Figura 38, é apresentada a corrente em cada uma das três fases, para o teste realizado com os dois motores. Como se pode observar, quando se ligam os motores, como era expectável, ocorre um pico de corrente, que é significativamente superior nas fases um e dois. É notório que, neste caso as correntes já não evoluem ao mesmo tempo, havendo um ligeiro desfasamento temporal entre ambas, o que representa que o arranque dos motores não é exatamente igual, tendo um arrancado mais depressa que o outro. No intervalo após o pico de corrente, os motores encontram-se em funcionamento com uma potência estabilizada. O valor da corrente em causa, neste caso, já é suficientemente elevado para ser observado no gráfico, rondando assim valores próximos de 1 A.

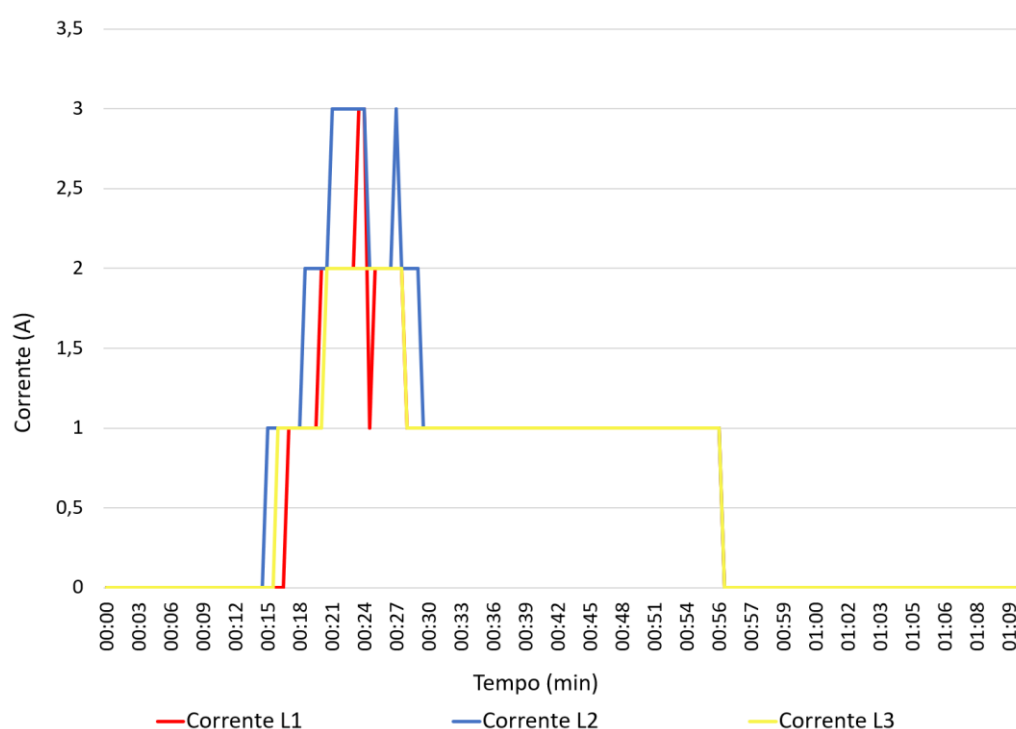


Figura 38 Análise da corrente para os 2 motores

Na Figura 39, é possível observar as potências por fase, e a potência total dos equipamentos, não existindo neste caso uma linha respectiva ao valor teórico. Como é notório, a potência nas três fases tem um comportamento muito semelhante, como já era de prever após a análise do gráfico das correntes, há uma ligeira superioridade na potência da fase dois. É possível observar, que durante os primeiros 15 segundos de emulação, o motor ainda se encontra desligado, no entanto já há algum consumo residual a ser contabilizado. O mesmo acontece nos últimos 15 segundos da emulação, nos quais o motor já não se encontra em funcionamento. Assim que os consumos estabilizam, a potência total do motores aproxima-se dos 0,45 kW. É também de notar que assim que se desligam os motores, a descida da potência não é instantânea, da mesma forma que também existe um intervalo de cerca de dezasseis segundos, quando ligados os motores, até que a potência fique constante.

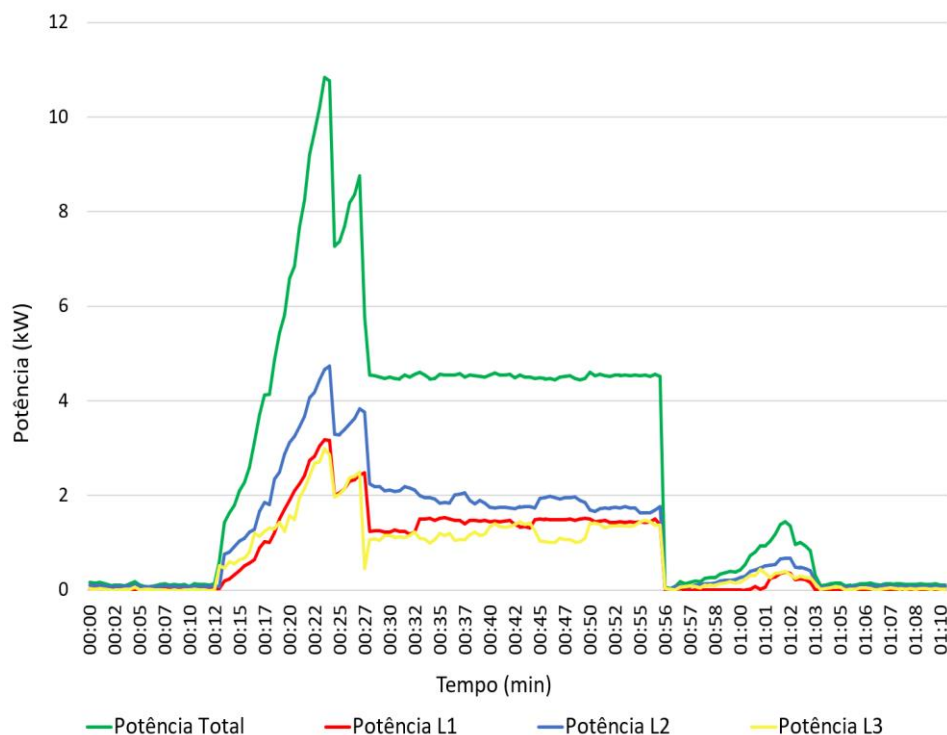


Figura 39 Análise da potência para os 2 motores

EMULADOR ASSÍNCRONO

Apresentados assim os resultados das cargas da MR, os próximos resultados a serem apresentados, são do emulador assíncrono, que é usado como representação das eólicas da MR. Este equipamento, como já referido, tem uma capacidade máxima de funcionamento de 36 m/s, o que representa, aproximadamente, 1 kW de potência. A realização do teste

deste equipamento, teve uma duração aproximada de seis minutos, sendo observada a tensão, a corrente e a potência ao longo deste período. Para tal, foi aumentada, com intervalos de um minuto, a velocidade do vento requisitada ao emulador, e consequentemente a produção de energia do mesmo. Como se pode ver na Figura 40, a tensão nas três fases do equipamento mantém-se com pequenas oscilações.

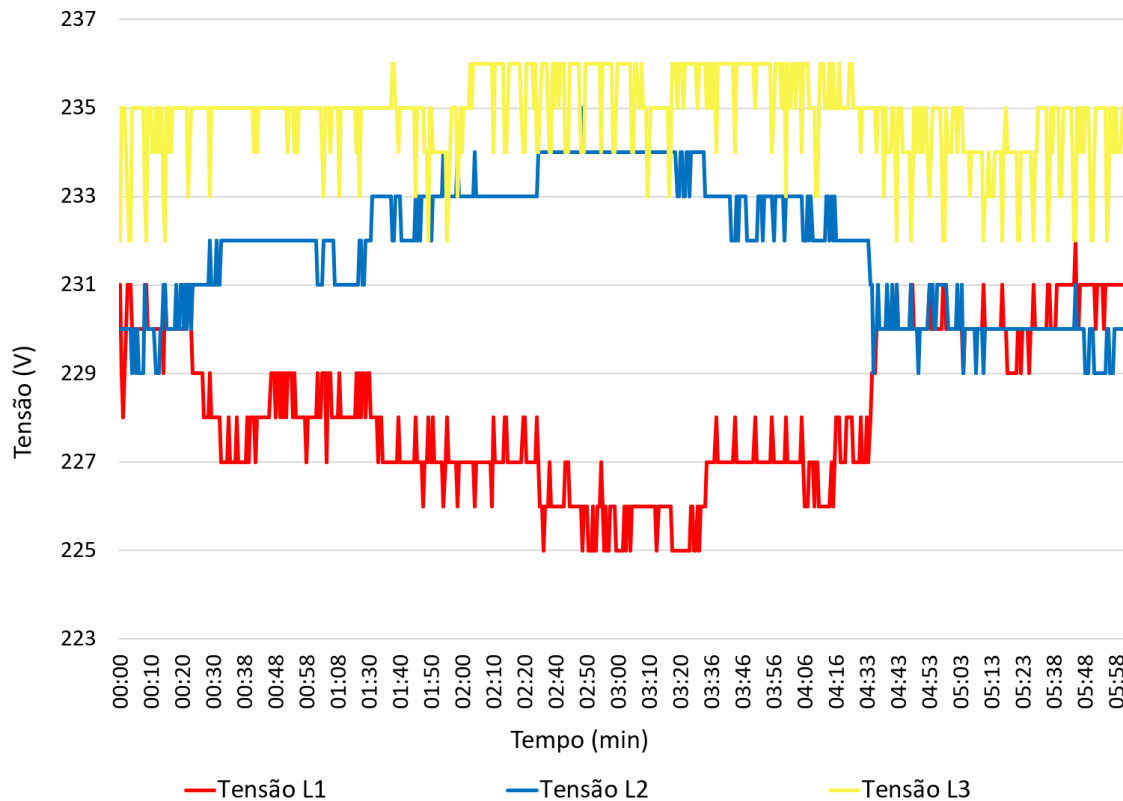


Figura 40 Análise da tensão para o emulador assíncrono

No intervalo em que o emulador se encontra a produzir, é possível perceber que há uma ligeira diminuição na tensão na fase um e um ligeiro aumento na fase dois, mantendo-se estável a fase três. É de notar também que essas variações que ocorrem nas diferentes fases, acompanham as variações na corrente e potência, e nunca têm oscilações muito grandes, não sendo preocupantes.

Na Figura 41, é apresentada a corrente em cada uma das três fases, no gerador assíncrono. Como era expectável, as correntes mantêm-se constantes e de acordo com a velocidade requisitada ao equipamento e consequente produção de energia elétrica. É possível ver também que, as correntes nas fases apresentam um perfil diferente, havendo períodos em que coincidem os seus valores. A corrente na fase um é aquela que apresenta valores mais elevados, chegando a atingir os 3A.

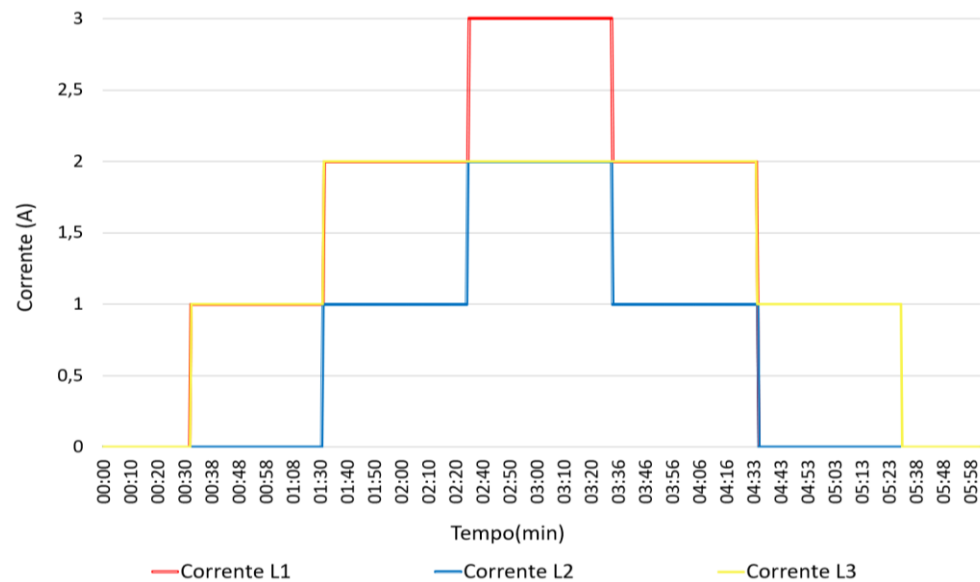


Figura 41 Análise da corrente para o emulador assíncrono

Na Figura 42, é possível observar as potências por fase, a potência total do equipamento, bem como o valor teórico, que é referente à produção do equipamento, originada pela velocidade do vento requisitada.

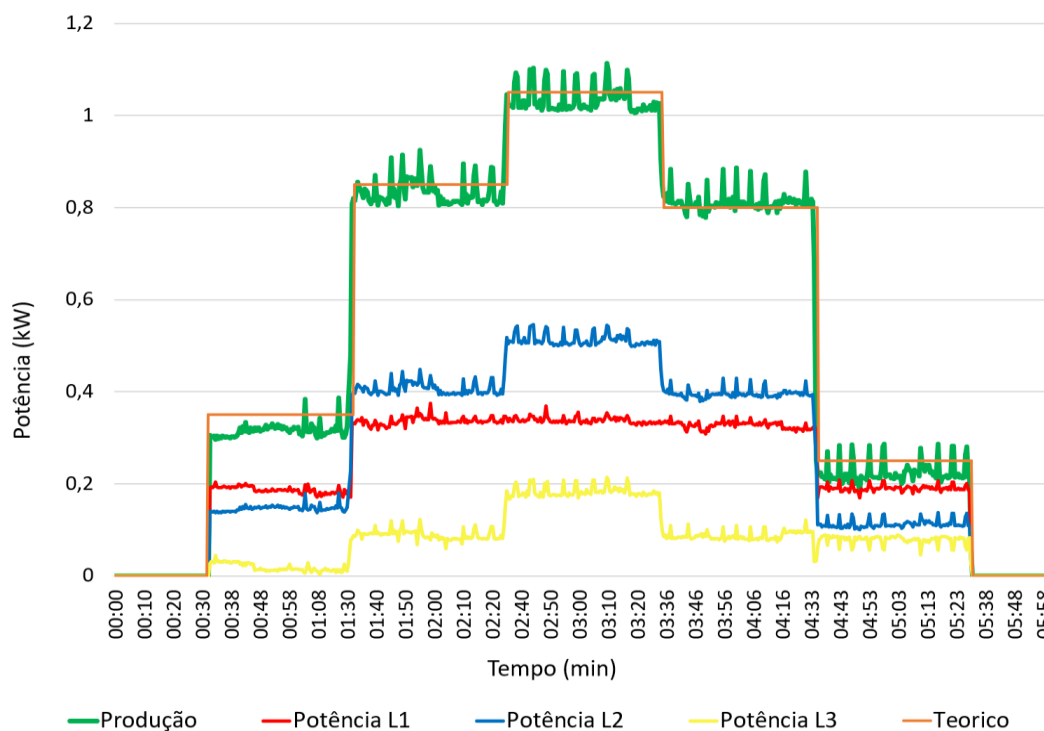


Figura 42 Análise da potência para o emulador assíncrono

É possível perceber que durante os primeiros trinta segundos de emulação, não é requisitada qualquer produção ao equipamento, sendo o valor do vento 0 m/s. O mesmo se

verifica nos trinta segundos finais da emulação. No período entre estes dois intervalos, são introduzidos no equipamento, valores de velocidade do vento de 10 m/s, 25 m/s, 36 m/s, 20 m/s, e 5 m/s, de minuto a minuto. Isto, representa uma produção de 0,35 kW, 0,85 kW, 1,05 kW, 0,80 kW e 0,25 kW respetivamente. Para cada um dos níveis de produção, pedidos ao equipamento, a resposta a nível temporal é rápida, mas é notório um ligeiro atraso. Por outro lado, com o aumento do valor de produção desejada, pode ver-se que o valor teórico e o valor real da potência total, tomam caminhos que apesar de diferentes, se encontram muito próximos. A potência total fica ligeiramente aquém do valor desejado na maioria dos momentos, no entanto apresenta valores em algumas situações superiores aqueles que era expectável. Isto demonstra que o emulador não é capaz de produzir valores constantes de energia elétrica, mesmo que seja para o mesmo valor de vento. Este tipo de incertezas são exatamente a razão pela qual este tipo de emulação é importante, de modo a perceber como vão responder os equipamentos, quando testados em conjunto na MR.

EMULADOR SÍNCRONO

Os próximos resultados a serem apresentados, são do emulador síncrono, que é usado como representação da central mini-hídrica da MR. Este equipamento como já referido, tem uma capacidade máxima de funcionamento de 3 kW, mas encontra-se limitado a 2,50 kW por questões de segurança.

A realização do teste deste equipamento, teve uma duração aproximada de onze minutos, sendo observada a tensão, a corrente e a potência ao longo deste período. Para tal, foi aumentada, com intervalos de um minuto, a potência total requisitada ao emulador, e consequentemente a produção de energia do mesmo. Como é possível observar na Figura 43, a tensão nas três fases do equipamento, apresentam elevadas variações na entrada e saída de funcionamento do equipamento. Estes valores surgem, pois, o equipamento antes da realização do teste encontrava-se desligado, então, quando ligado é necessário aguardar que haja o sincronismo entre o equipamento e a rede. Como se pode ver, em cerca de vinte segundos, o emulador encontra-se disponível para produção, sendo aquelas variações de tensão pontuais, até que o gerador está em sincronismo com a rede, repetindo-se quando o gerador é desconectado da rede e desligado de seguida. No intervalo em que o emulador se encontra conectado à rede, é possível perceber que os valores de tensão nas três fases se mantêm com as oscilações esperadas, não havendo situações de maior destaque a assinalar.

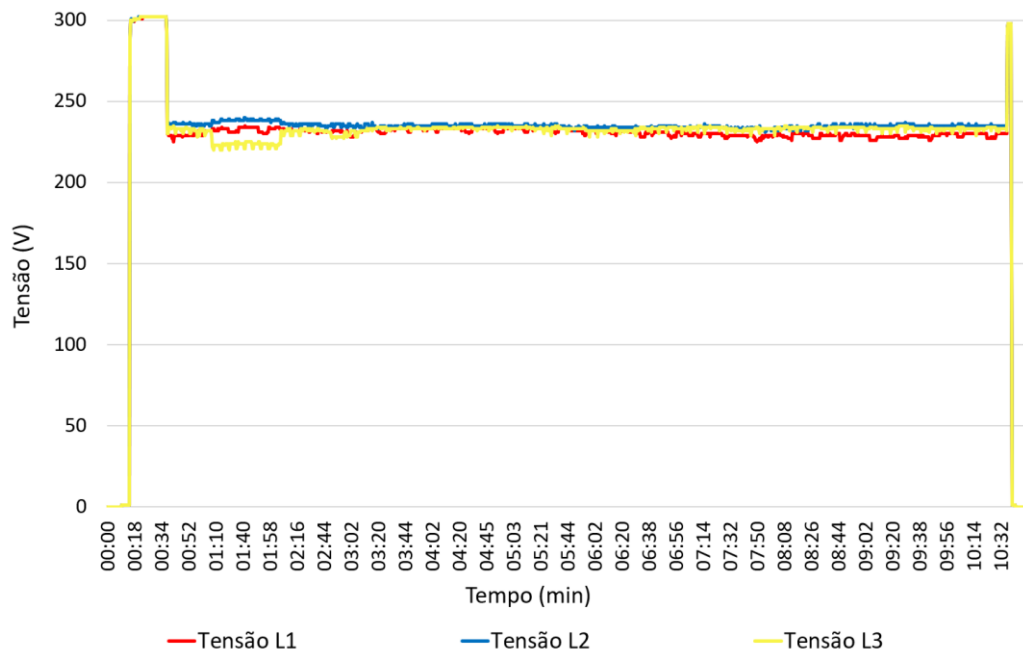


Figura 43 Análise da tensão para o emulador síncrono

Na Figura 44, é apresentada a corrente em cada uma das três fases no gerador síncrono. Como era expectável, as correntes mantêm-se constantes, de acordo com a potência requisitada ao equipamento, e consequente de acordo com a produção de energia elétrica.

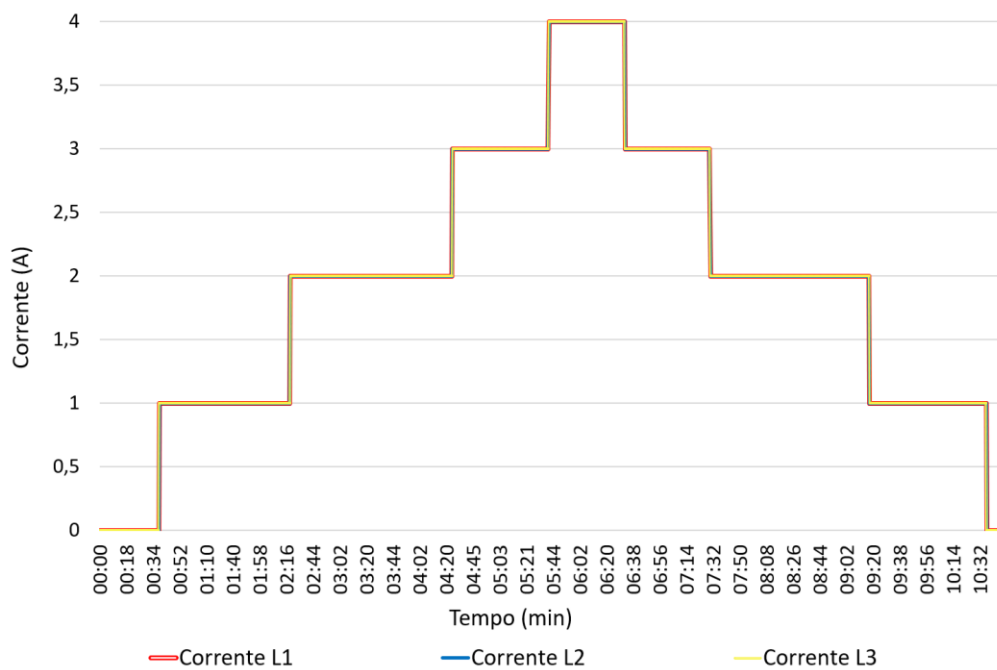


Figura 44 Análise da corrente para o emulador síncrono

É possível ver também que, as correntes nas três fases, apresentam um perfil igual, chegando mesmo a atingir, valores de 4 A. O perfil de correntes apresenta-se simétrico,

uma vez que as potências requisitadas ao equipamento são iguais, quer para a fase de aumento, como para a fase de diminuição de potência.

Na Figura 45, pode ver-se as potências por fase, a potência total do equipamento, bem como o valor teórico, referente à produção do equipamento. É possível perceber que durante os primeiros trinta segundos de emulação, não é pedida qualquer produção ao equipamento, bem como nos trinta segundo finais da emulação. No período entre estes dois intervalos, são introduzidos no equipamento, valores de potência de 0,50 kW até 2 kW, com um incremento de 0,50 kW a cada minuto. Assim, que atingido o valor máximo, é feito o mesmo, mas desta vez diminuindo até 0,50 kW. Para cada um dos níveis de produção, pedidos ao equipamento, a resposta a nível temporal é lenta, em comparação com os outros equipamentos. Por outro lado, com o aumento do valor de produção desejada, pode ver-se que o valor teórico e o valor real da potência total, tomam valores muito próximos. A potência total fica, na maior parte do tempo, em valores superiores aos desejados, sendo ligeiramente inferior nos restantes momentos. Isto demonstra que este emulador, é capaz de produzir os valores de energia que lhe são pedidos, havendo apenas um atraso na resposta do mesmo.

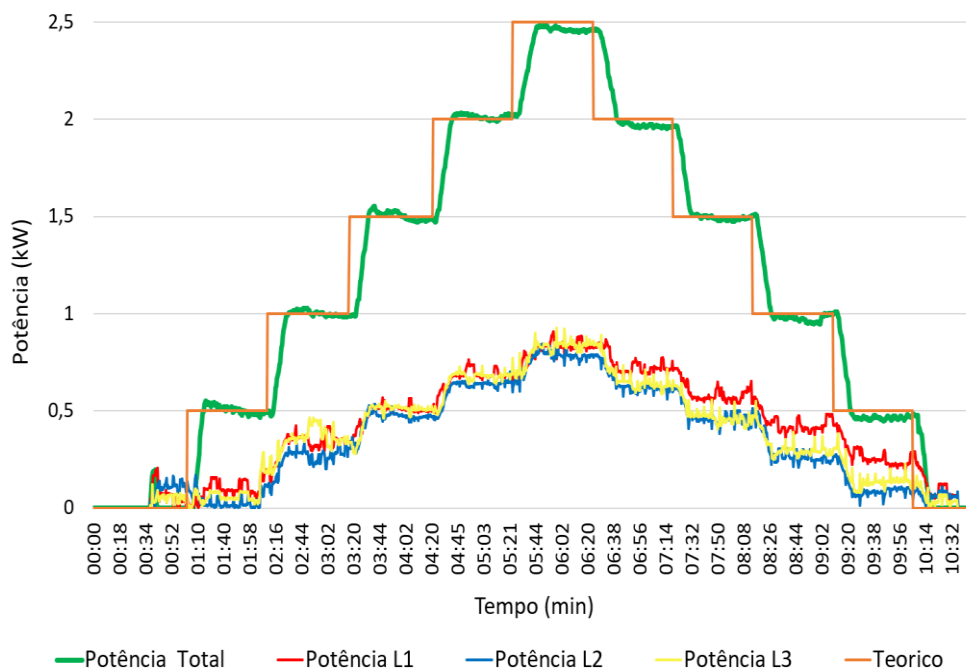


Figura 45 Análise da potência para o emulador síncrono

CARGA POR NÍVEIS

Seguindo a ordem usada na descrição dos equipamentos, no capítulo referente à metodologia, os próximos resultados a serem apresentados, são da carga por níveis. Este equipamento, é usado como representação das residências habitacionais da MR. Este, como já referido, tem uma capacidade máxima de funcionamento de 4 kW, por cada nível, totalizando 24 kW. No entanto, para este teste foi apenas considerada uma carga. A realização do teste deste equipamento, teve uma duração aproximada de três minutos e trinta segundos, sendo observada a tensão, a corrente e a potência ao longo deste período. Para tal, foi aumentada, com intervalos de trinta segundos potência total requisitada à carga. Como se pode ver na Figura 46, na tensão nas três fases do equipamento, é notória uma queda de tensão considerável na fase um. Este valores surgem, pois, como só é utilizado um nível da carga, o mesmo encontra-se conectado à fase um. Deste modo, todo o impacto da carga será nessa fase, havendo uma tendência oposta nas restantes fases, dado à descompensação da carga.

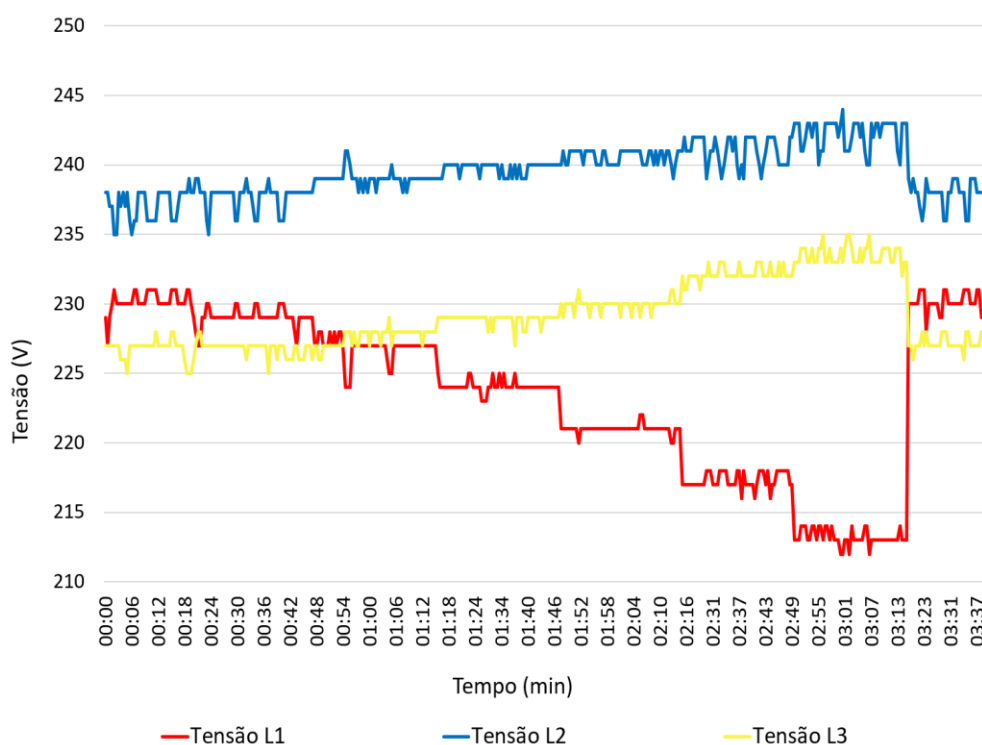


Figura 46 Análise da tensão para a carga por níveis

Na Figura 47, é apresentada a corrente em cada uma das três fases, no nível um da carga por níveis. Como era expectável, as correntes nas fases dois e três são nulas, uma vez como já referido, o primeiro nível se encontrar conectado à fase um. Como tal, o valor da corrente na fase um mantém-se constante e de acordo com a potência requisitada à carga.

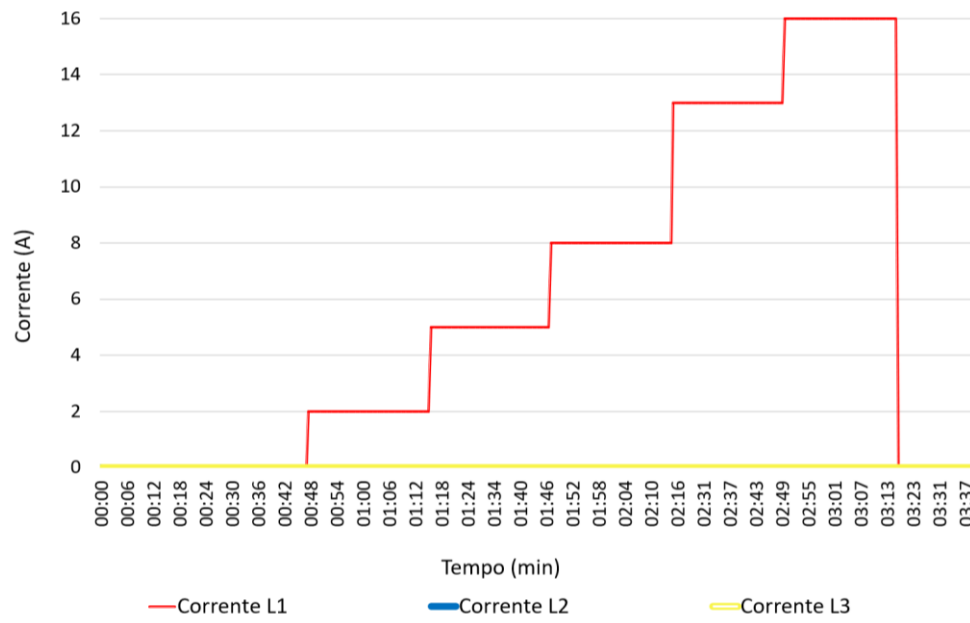


Figura 47 Análise da corrente para a carga por níveis

Na Figura 48, é possível observar as potências por fase, a potência total do equipamento, bem como o valor teórico, referente à produção do equipamento, originada pela potência requisitada. É possível perceber que durante os primeiros quinze segundos de emulação, não é pedida qualquer potência à carga.

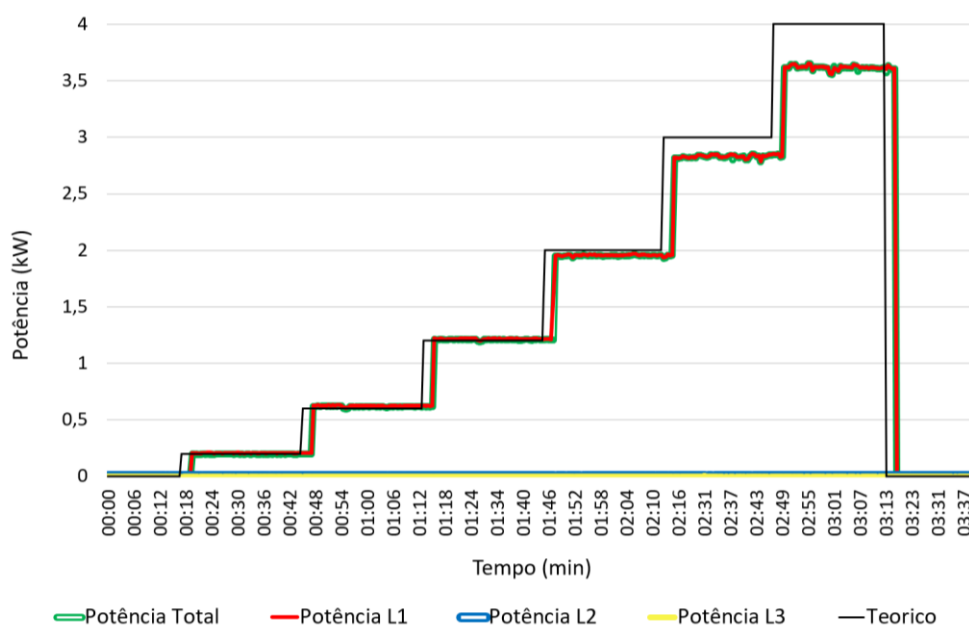


Figura 48 Análise da potência para a carga por níveis

O mesmo se verifica nos quinze segundos finais da emulação. No período entre estes dois intervalos, são introduzidos no equipamento, valores de potência de 0,20 kW, 0,60 kW,

1,20 kW, 2 kW, 3 kW e 4 kW a cada trinta segundos. Para cada um dos níveis de potência, pedidos ao equipamento, a resposta a nível temporal é lenta, em comparação com os outros equipamentos. É também de notar que, com o aumento do valor de carga desejado, o valor teórico e o valor real da potência total, tomam valores muito próximos até aos 2 kW. No entanto, para valores superiores a diferença mostra-se significativa. É de acrescentar também, que a potência total e a potência na fase um apresentam o mesmo valor, mais uma vez, isto deve-se ao facto do nível da carga utilizado estar ligado à fase um. Deste modo, as fases dois e três não apresentam qualquer valor de potência, como seria de esperar.

Terminada a análise aos equipamentos de forma individual, destaca-se a emulação da MR em laboratório. Para tal, os resultados aqui apresentados serão essenciais, de forma a que se possa adequar os tempos de resposta, bem como a variação entre os valores desejados, e os valores reais de potência. Como vimos, cada equipamento tem uma evolução e uma resposta distinta, face às variadas situações que foram testadas. Deste modo, esta análise será muito importante na emulação da MR, na qual será emulado *ramping* usando programas de DR.

5.2. RAMPING IN DEMAND RESPONSE

Nesta subsecção serão apresentados os resultados referentes ao capítulo do caso de estudo. É importante referir que o intervalo de três horas e trinta minutos seleccionado, para emular em laboratório, por razões lógicas não foi usado. Como tal, esse intervalo com quarenta e dois períodos, foi convertido em dez minutos de emulação. Deste modo, cada período corresponde a vinte segundos de emulação. Esta explicação ajuda assim a entender os valores que encontramos no eixo do “Período” nos gráficos apresentados a partir deste ponto. Ou seja, os cerca de mil duzentos e sessenta valores encontrados, traduzem a redução dos quarenta e dois períodos, para períodos com apenas vinte segundos, totalizando dez minutos de emulação.

Na Figura 49, como se pode observar é apresentado o consumo da MR, antes e depois das reduções. Os valores apresentados, são o resultado de duas emulações distintas. Ou seja, os valores relativos ao consumo original da MR, foram inicialmente emulados nos equipamentos do laboratório. Desta forma, com esses valores foi possível criar esta linha, que representa o consumo da MR, antes de qualquer intervenção, que servirá de termo de comparação para a nova linha de consumos, já com as reduções aplicadas. Estes valores de

consumo, emulados, têm por base o perfil apresentado no caso de estudo, sendo agora valores reais da MR, testada no laboratório.

Na segunda emulação, criou-se o perfil de consumos, com recurso a três cargas. O grupo de motores, representando os motores de rega, a carga de 30 kW, representando as residências habitacionais, e, por último, a carga por níveis, representando o consumidor comercial. Este perfil numa fase inicial, acompanha os valores do perfil original até que, como era previsto, é iniciado o primeiro programa de redução de cargas, o IDRP. Este programa, conta com um tempo de notificação dos consumidores, para que desliguem os motores. De seguida, inicia-se o tempo atual de resposta, ou de atuação, que se traduz no tempo necessário até à redução das cargas dos três programas implementados. Este, é aquele que tem maior duração, uma vez que é voluntário. Para a emulação, respeitando os tempos indicados, no laboratório desligou-se o grupo dos motores, provocando a descida de consumos, que se pode observar no gráfico. Como é notório, já existe uma diferença significativa entre o atual valor de consumo e o original. No entanto, a redução não é suficiente, portanto, procede-se ao segundo programa de redução de cargas, o DLC T1. Este programa, tem um tempo de notificação mais curto, e, conseqüentemente, um tempo total mais curto. Uma vez que o controlo das cargas neste programa é direto, dada a obrigatoriedade do mesmo, após o tempo de notificação são feitas as respetivas reduções.

Na emulação feita em laboratório, esta redução foi feita na carga por níveis, reduzindo o valor desejado aos consumos e respeitando o tempo de notificação, procedendo à redução. Este, tem início quando começa o tempo de atual de resposta, terminando o mesmo logo após a redução estar concluída. Sendo, o tempo atual de resposta, o tempo que os equipamentos demoram até concluir a redução. Como pode ser observado no gráfico, ainda foi aplicado mais um programa de redução de cargas, o DLC T2, que se destina à redução dos consumos no edifício comercial da MR. À semelhança do programa anterior, este também é de regime obrigatório. Como tal em laboratório, foi necessário aguardar o tempo de notificação, e de seguida procedeu-se a redução, desta vez na carga de 30 kW. A partir desse momento, contabiliza-se o tempo de atuação e quando o mesmo termina, termina o programa. Como referido no caso de estudo, neste momento a redução necessária pelos programas está concluída, no entanto não é suficiente. Sendo então, o valor restante proveniente da central mini-hídrica, emulada no gerador síncrono. Ou seja, este último valor, acaba por não ser uma redução, mas sim uma produção de energia extra. No entanto,

na emulação em laboratório, este valor surge como uma potência negativa, que é reduzida à existente de momento. Isto facilita a interpretação das linhas dos consumos, antes e depois da redução. Como é referido no caso de estudo, é necessária uma redução de 4 kW proveniente dos programas de DR, e 1,50 kW que não seriam uma redução, mas sim, um aumento da produção, de forma a colmatar o restante défice de produção. Igualando assim, o consumo e a produção.

Como se pode ver na Figura 49, o valor total de redução de consumos, proveniente de programas de DR, é inferior aos 4 kW previstos. O mesmo se verifica, no valor proveniente da produção do emulador síncrono, que é ligeiramente inferior a 1 kW. De acordo com os valores estabelecidos no caso de estudo, estes demonstram-se inferiores aqueles previstos. Isto, deve-se à resposta dos equipamentos em laboratório durante a emulação. No entanto, o *ramping period* termina, iniciando o evento de DR, atingindo assim o valor de consumos pretendido, de cerca 2 kW. Como previsto no caso de estudo, é atingida uma redução significativa relativamente ao valor de consumo original, garantindo assim o funcionamento da MR.

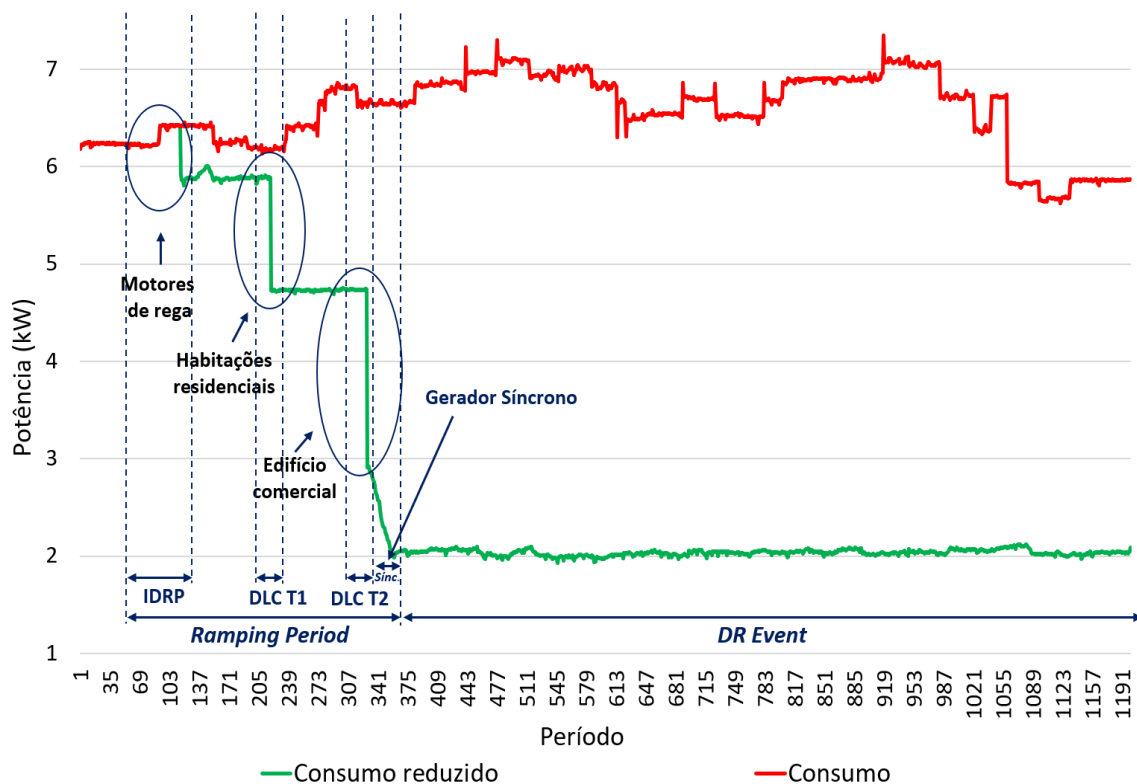


Figura 49 Análise do *ramping* usando DR programs

Analisado assim o novo perfil de consumos da MR, emulado em laboratório, é importante analisar as tensões nas três fases da MR.

Como se pode ver na Figura 50, as tensões nas três fases apresentam valores que vão oscilando ao longo do tempo. As tensões na fase dois e na fase três, não apresentam qualquer motivo de preocupação, mantendo-se em gamas de valores considerados normais. Relativamente à fase um, é notório que existe uma ligeira queda na tensão na fase inicial da emulação, que se devidamente analisada, ocorre até ao momento em que é aplicado o terceiro programa de redução. Como visto anteriormente, o programa DLC T2 é aplicado na carga por níveis, ou seja, nesse momento o consumo desse equipamento passa a ser mais baixo. Como já referido na análise individual de cada equipamento, na carga por níveis, como cada nível se encontra ligado a uma fase diferente, ocorre uma redução à tensão nessa fase. Nesta emulação, dada a baixa potência necessária foi usado apenas o primeiro nível. Consequentemente, estava a ser usada a fase um, o que origina a quebra na tensão da fase um, até ao momento em que a carga aplicada aquele equipamento, é reduzida. Como é de notar, no restante período os valores de tensão da fase um, à semelhança das restantes, mantêm-se numa gama de valores aceitável.

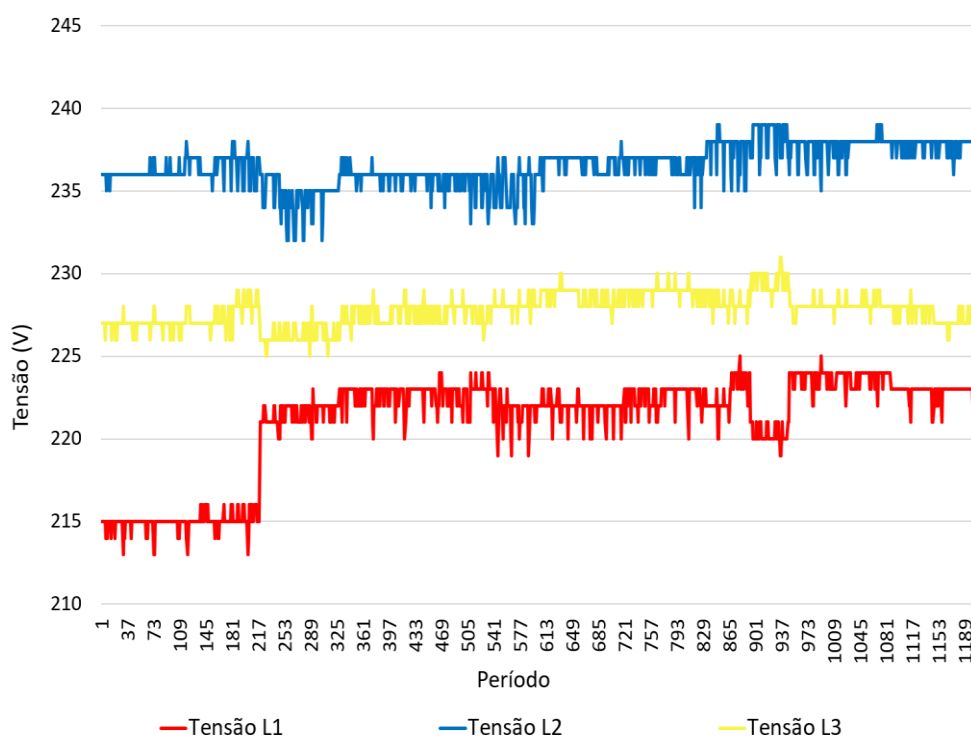


Figura 50 Análise das tensões no *ramping*

Como já apresentado até então, analisa-se o consumo e a tensão, para o intervalo de emulação. Até agora não foram consideradas as produções de energia elétrica emuladas, apenas os consumos.

Deste modo, na Figura 51 pode analisar-se as produções no emulador do gerador síncrono e assíncrono. A linha a azul, representa a produção de energia elétrica através do emulador gerador assíncrono, que representa a energia eólica da MR. Como se pode ver, existem várias oscilações no perfil emulado neste equipamento, que retratam a incerteza do vento na realidade. Estes foram os valores considerados de produção para o intervalo de emulação, não tendo sido emulados quaisquer valores referentes à produção fotovoltaica. Esses dados, foram considerados os mesmo do perfil apresentado no caso de estudo, dada a impossibilidade de emular os mesmos em laboratório. A totalidade de produção proveniente das eólicas e dos painéis fotovoltaicos, somada à capacidade dos programas de DR aplicados aos consumos, definem o valor necessário a emular no gerador síncrono.

Como já referido, o emulador síncrono do laboratório representa a central mini-hídrica da MR. Para o intervalo de emulação, foram apenas considerados os valores necessários de produção para o período em análise. Como tal, no gráfico é demonstrado apenas o aumento de produção desde 0 kW, que representam o momento em que se ativa o emulador do gerador síncrono, como se pode observar na Figura 49, até ao momento em que atinge valores próximos de 1 kW. Estes representam o valor necessário de produção em falta na MR, mantendo-se assim até ao final do intervalo em emulação. É de salientar, que no período anterior ao que se inicia a produção do gerador síncrono, o valor de produção do mesmo na MR não é nulo. No entanto, para uma melhor perceção, daquilo que acontece, a emulação foi feita partindo da produção nula, aumentando a produção para o valor necessário, quando todos os programas de DR são ativados. Como é perceptível, na explicação do caso de estudo, o gerador síncrono é apenas usado em último recurso, e o mesmo estava a ser usado no período anterior ao que começa o intervalo em estudo. Deste modo, é possível entender que na MR através da Figura 51, neste momento o gerador síncrono iria adequar a sua produção ao novo valor que lhe seria solicitado. Sendo este, independente do valor que se encontrava a produzir no período anterior, como já referido foi apenas considerada a sua produção para este intervalo em estudo.

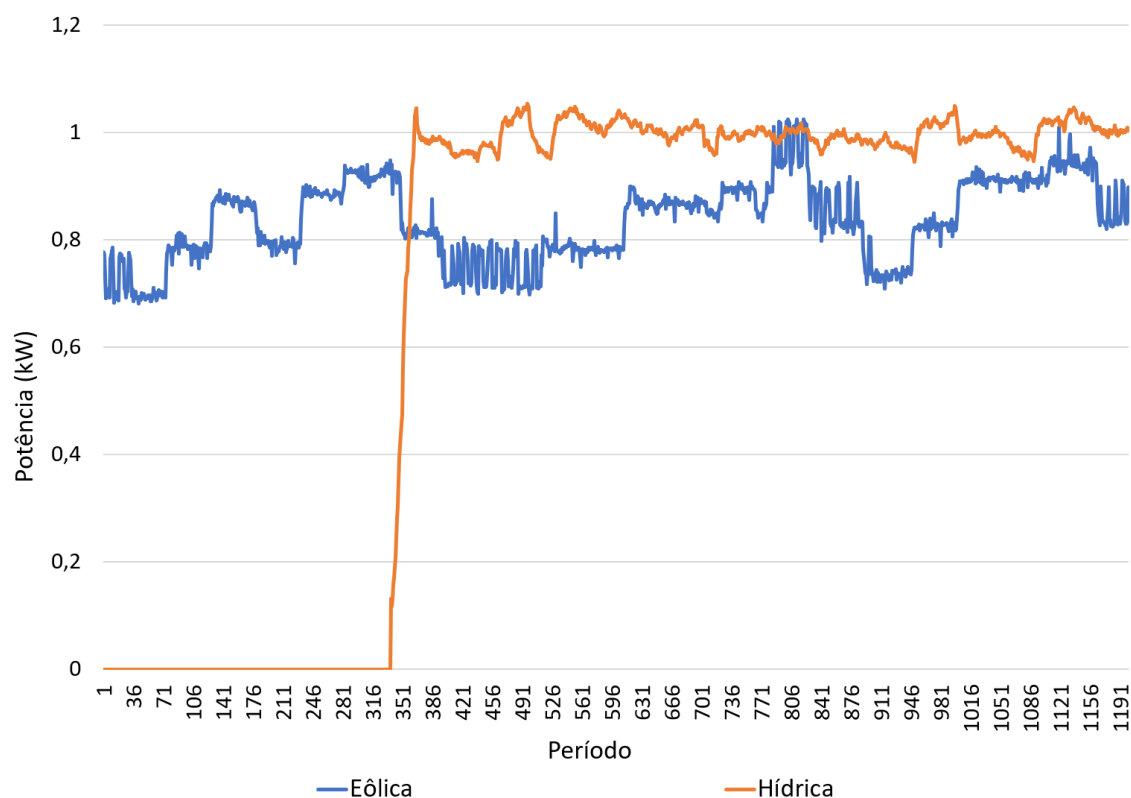


Figura 51 Análise da produção de energia elétrica durante o *ramping*

A apresentação destes resultados, numa primeira fase, permitiu que se compreendesse o funcionamento dos equipamentos, de forma a poder adequar o seu funcionamento para o caso de estudo. Através da metodologia criada para este caso de estudo, foi possível para períodos em que a diferença entre consumos e produções era elevada, aplicar programas de DR garantindo um equilíbrio entre estes na MR. O uso de energias renováveis, combinado com a utilização da rede de distribuição, garante o abastecimento elétrico em momentos em que o défice entre consumos e produções é reduzido. Quando o consumo é muito superior à produção, a utilização de programas de DR permite estabelecer um equilíbrio entre ambos. Assim, o abastecimento elétrico da MR é garantido, salvaguardando a segurança e as necessidades dos consumidores.

6. CONCLUSÕES

A produção descentralizada usando fontes de energia renovável, é um contributo significativo para a redução das emissões de carbono, permitindo dar mais um passo em direção à neutralidade carbónica. O uso dos recursos renováveis, permite às redes elétricas uma alternativa aos combustíveis fósseis. Trazendo não só vantagens ambientais, mas também económicas, uma vez que, nestas MR a utilização prioritária de energia de fontes renováveis permite produzir energia elétrica usando recursos disponíveis, sem a necessidade de pagar por eles. As vantagens económicas e ambientais são significativas, no entanto é importante garantir a fiabilidade e segurança destas micro redes. Como tal, o uso de *demand response* é uma estratégia crucial de gestão e controlo, permitindo assegurar o controlo dos consumos, face à produção.

Face à necessidade de garantir a segurança e fiabilidade das redes elétricas com elevada integração de produção distribuída, foi implementada, em laboratório uma micro rede. Assim, foi possível emular o comportamento dos equipamentos e compreender o seu funcionamento, usando programas de *demand response* em *ramping*. Para tal, foi aplicada uma metodologia, e criou-se para cada equipamento uma interface de controlo, que se demonstrou crucial. Com a metodologia definida para o caso de estudo, foi selecionado o intervalo para emular. Posto isto, procedeu-se à emulação e surgiram os resultados apresentados. Esta implementação em laboratório, permitiu emular uma micro rede com

elevada integração de fontes de energia renovável, onde são usados programas de *demand response* para equilibrar os consumos face às produções. A emulação desta metodologia foi essencial à compreensão dos tempos de resposta e características técnicas dos equipamentos, pois em caso de simulação estaríamos a considerar uma micro rede ideal, que na verdade não existe. Nas emulações os equipamentos não respondem imediatamente, uma vez que há inércia e isso torna esta abordagem fundamental. A não emulação de um projeto deste tipo, passando diretamente para a implementação na rede real, teria consequências desastrosas, colocando em risco a segurança e a integridade da rede.

A emulação, teve início de forma singular a cada equipamento, permitindo avaliar o comportamento de cada máquina, de forma a poder prever comportamentos para definir o caso de estudo. Como vimos, nos resultados apresentados de cada equipamento, a tensão, sofre algumas variações, no entanto sem nunca se demonstrarem relevantes. O mesmo se verifica nas correntes, mas quando nos referimos à potência, há alterações a realçar. Nos equipamentos de consumo, o valor de potência requisitada ao equipamento não era cumprido, ficando para certos valores aquém do desejado. Também se verificou alguma carga residual em alguns equipamentos e ainda, um pico inicial de consumo no caso dos motores. É de acrescentar que, um dos equipamentos de consumo revelou um atraso relativo no tempo de resposta. Relativamente ao emuladores de produção, é essencial referir que as produções ficam ligeiramente aquém das requisitadas, e o tempo de resposta dos equipamentos tem um atraso significativo. Estes resultados demonstraram-se cruciais para a realização do caso de estudo, dado a existência de questões técnicas associadas à implementação.

Relativamente à aplicação de ramping em demand response, no intervalo selecionado para o caso de estudo, foram considerados três programas de DR e o uso do gerador síncrono, de forma, a garantir a redução necessária definida. Como referido, há um tempo específico para que cada programa ocorra, e é essencial a análise a esses tempos, para não ocorrerem atrasos. Cada consumidor da rede, é remunerado pela redução que aplicar e isto deve ser feito com rigor. A principal razão para a realização destes testes em laboratório, é a inércia do sistema. Cada consumidor, quer ser pago imediatamente desde o momento que deixa de poder utilizar as suas cargas, mas a verdade é que há um atraso na entrada e saída dos equipamentos em funcionamento, que tem de ser analisado para não colocar a micro rede em risco de apagão.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Jiang, J. Zhong, S. M. Malik e Y. Sun, “A Small Isolated Power System SCUC Model with State-Controllable Wind Power,” em *3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, Beijing, China, 2016.
- [2] R. M. González, S. S. Torbaghan, M. Gibescu e S. Cobben, “Harnessing the Flexibility of Thermostatic Loads in Microgrids with Solar Power Generation,” *Energies*, vol. 9 (7), nº 547, 2016.
- [3] O. Abrishambaf , P. Faria e Z. Vale, “Ramping of Demand Response Event with Deploying Distinct Programs by an Aggregator,” *Energies*, vol. 13 (6), nº 1389, 2020.
- [4] J. Soares, B. Canizes, M. A. F. Ghazvini, Z. Vale and G. K. Venayagamoorthy, “Two-Stage Stochastic Model Using Benders’ Decomposition for Large-Scale Energy Resource Management in Smart Grids,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, nº 6, 5905-5914, 2017.
- [5] J. Soares, T. Pinto, F. Lezama e H. Morais, “Survey on Complex Optimization and Simulation for the New Power Systems Paradigm,” *Complexity*, 1-32, 2018.
- [6] T. Sousa, Z. Vale, J.P. Carvalho, T. Pinto e H. Morais “A hybrid simulated annealing approach to handle energy resource management,” *Energiy, Elsevier*, vol. 67(C), 81-96, 2020.
- [7] Z. Vale, H. Morais, P. Faria e C. Ramos, “Distribution system operation supported by contextual energy resource management based on intelligent SCADA,” *Energy, Elsevier*, vol. 52 (C), 143-153, 2013.
- [8] EDP Distribuição, “Redes de energia + inteligentes,” [Online]. Available: <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/redes-do-futuro/redes-de-energia-inteligentes>. [Acedido em 15 Setembro 2020].

- [9] C. Lo e N. Ansari, “Decentralized Controls and Communications for Autonomous Distribution Networks in Smart Grid,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, nº 1, pp. 66-77, 2013.
- [10] W. Yi, Y. Zhang, Z. Zhao e Y. Huang, “Multiobjective Robust Scheduling for Smart Distribution Grids: Considering Renewable Energy and Demand Response Uncertainty,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 45715 - 45724, 2018.
- [11] J. P. Fossati, “Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes,” *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, nº 9, pp. 13-20, 2011.
- [12] Siemens, “Siemens,” [Online]. Available:
<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/topics/smart-grid.html>. [Acedido em 20 Setembro 2020].
- [13] EDP Distribuição, “Files” [Online]. Available:
httpswww.edpdistribuicao.pt/sites/default/files/2019-04/Novos_Equipamentos.pdf. [Acedido em 15 Setembro 2020].
- [14] EDP Distribuição, “Energy Box,” [Online]. Available:
<https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/redes-do-futuro/redes-inteligentes/contadores-inteligentes>. [Acedido em 15 Setembro 2020].
- [15] F. Mwasilu, J. J. Justo, E.-K. K. Kim, T. D. Do e J.-W. Jung, “Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 501 - 516, 2014.
- [16] O. Abrishambaf, P. Faria, L. Gomes , J. Spínola, Z. Vale e J. M. Corchado, “Implementation of a Real-Time Microgrid Simulation,” *Energies*, vol. 10 (6), pp. 1-14, 2017.
- [17] X. Kang, C. E. Nuworklo, B. S. Tekpeti e . M. Kheshti, “Protection of micro-grid systems: a comprehensive survey,” *The Journal of Engineering*, vol. 2017, nº 13, pp. 1515-1518, 2017.

- [18] S. Mei, R. Li, X. Xue, Y. Chen, Q. Lu, X. Chen, C. D. Ahrens, R. Li e L. Chen, “Paving the way to smart micro energy grid: concepts, design principles, and engineering practices,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 3, nº 4, pp. 440-449, 2017.
- [19] B. Sah, A. Kumar, G. Bam e P. Kumar, “A Hybrid Micro Grid for Remote Village in Himalayas,” em *Renewable Power Generation Conference*, Nápoles, 2014.
- [20] T. Kumrai, K. Ota, M. Dong, K. Sato e J. Kishigami, “Optimising operation management for multi-micro-grids control,” *IET Cyber-Physical Systems: Theory Applications*, vol. 3, nº 1, pp. 24-33, 2018.
- [21] C. L. Moreira e J. A. P. Lopes, “Microgrids Operation and Control Under Emergency Conditions,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 15, pp. 1-18, 2009.
- [22] N. Hatziargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*, United Kingdom: Wiley – IEEE Press, 2013, 340.
- [23] M. Ebrahimi, M. N. Hashemnia, M. Ehsan, e E. Amir, “A Novel Approach to Control the Frequency and Voltage of Microgrids in Islanding Operation},,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 562-566, 2012.
- [24] N. A. Luu, Q. T. Tran e S. Bacha, “Control strategies of a hybrid PV-diesel-battery system in,” em *Grenoble Conference IEE*, França, 2013.
- [25] S. Haider, G. Li e K. Wang, “A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid,” *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, nº 1, pp. 2367-0983, 2018.
- [26] D. Nikolic, M. Negnevitsky, M. d. Groot, S. Gamble, J. Forbes e M. Ross, “Fast demand response as an enabling technology for high renewable energy penetration in isolated power systems,” em *IEEE PES General Meeting / Conference & Exposition*, National Harbor, 2014.
- [27] S. A. P. Kani e M. Hashem, “Real-Time Central Demand Response for Primary

- Frequency Regulation in Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3(4), pp. 1988-1996, 2012.
- [28] S. Pierluigi, “Demand response and smart grids—A survey,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 30, pp. 461-478, 2014.
- [29] R. Martinez-Cid e E. O'Neill-Carrillo, “Sustainable microgrids for isolated systems,” em *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, New Orleans, LA, USA, 2010.
- [30] M. Groot, J. Forbes e D. Nikolic, “Demand response in Isolated Power Systems,” em *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Hobart, Tasmânia, 2013.
- [31] . V. Durvasulu e T. Hansen, “Benefits of a Demand Response Exchange Participating in Existing Bulk-Power Markets,” *Energies*, vol. 11(12), p. 3361, 2018.
- [32] O. Abrishambaf, P. Faria e Z. Vale, “Application of an optimization-based curtailment service provider in real-time simulation,” *Energy Informatics*, vol. 1, nº 3, 2018.
- [33] F. Lauro, F. Moretti, A. Capozzoli e S. Panzieri, “Model Predictive Control for Building Active Demand Response Systems,” *Energy Procedia*, vol. 83, pp. 494-503, 2015.
- [34] M. Scholl, *Sistema SCADA Open Source*, Ph.D., Universidade Federal de Rio Grande, 2015, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/304381786_Sistema_SCADA_Open_Source. [Acedido em 1 Outubro 2020].
- [35] J. Gao, J. Liu, B. Rajan, R. Nori, B. Fu, Y. Xiao, W. Liang e C. L. P. Chen, C, “SCADA communication and security issues,” *Security and Communication Networks*, vol. 7, nº 1, pp. 175-194, 2014.
- [36] K. V. Kumar e D. B. R., “Supervisory control and data acquisition (SCADA),” *Subtransmission and distribution levels in power systems*, Maio 2013.
- [37] T. Turc e A. Morar, “Redundancy Based Secure SCADA Architecture for Gas Plant,”

Acta Electrotehnica, vol. 51, nº 4, p. 261, 2010.

- [38] V. Zita, H. Morais, P. Faria, H. Khodr, J. Ferreira, P. Kadar, “Distributed Energy Resources Management with Cyber-Physical SCADA in the Context of Future Smart Grids,” 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Valleta, 431-436, 2010.
- [39] rizal.medanguide, “Vecteezy,” [Online]. Available: <https://pt.vecteezy.com/artefetorial/663029-ilustracao-de-cidade-de-energia-renovavel>. [Acedido em 1 Setembro 2020].
- [40] O. Abrishambaf, P. Faria, V. Zita e J. C. Rodríguez, “Energy Scheduling Using Decision Trees and Emulation: Agriculture Irrigation with Run-of-the-River Hydroelectricity and a PV Case Study,” *Energies*, vol. 12, p. 3987, 2019.
- [41] VirtualExpo Group, “CLP E/S integrado Saia PCD3.M5 series” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/saia-burgess-controls-sbc/product-58769-1565634.html>
- [42] VirtualExpo Group, “CLP box Saia PCD1.M2xxx series” [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/prod/saia-burgess-controls-sbc/product-58769-1565682.html>